



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
VICERRECTORADO ACADÉMICO  
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO  
ÁREA DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y DE GESTIÓN  
POSTGRADO EN GERENCIA DE PROYECTOS**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO  
DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EN LA DETERMINACIÓN DE UNA FAMILIA  
DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO  
ARTIFICIAL**

Presentado Por  
Carrillo Luciani, Jesús Arturo

Para optar al título de  
**Especialista en Gerencia de Proyectos**

Asesor  
Aponte Figueroa, Gloria María

Caracas, julio de 2010



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
VICERRECTORADO ACADÉMICO  
DIRECCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO  
ÁREA DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y DE GESTIÓN  
POSTGRADO EN GERENCIA DE PROYECTOS**

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EN LA DETERMINACIÓN DE UNA FAMILIA DE  
CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL**

**Autor: Carrillo L., Jesús A.  
Asesor: Aponte F., Gloria M.  
Año: 2010**

**RESUMEN**

Durante mucho tiempo la industria petrolera ha dedicado grandes esfuerzos en seleccionar, cuál será el mejor método de producción, que se requiere en un determinado pozo y/o yacimiento con el fin de lograr un máximo recobro de hidrocarburos sin el peligro de agotar el yacimiento en forma prematura y optimizar el costo de producción. Siguiendo los lineamientos establecidos por la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL) para la elaboración del presente Trabajo Especial de Grado, la modalidad de investigación seleccionada, es la de investigación Documental Bibliográfica, entendiéndose por esto, *"...El estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo principalmente, en fuentes bibliográficas, documentales y estadísticas. La originalidad del estudio se refleja en el enfoque, criterios, conceptualizaciones, conclusiones, recomendaciones y en general en el pensamiento del autor"*. Es también un estudio de campo porque se le administró un cuestionario a especialistas en el área de ingeniería, específicamente a aquel personal entrenado en lo referente a Sistemas de Levantamiento Artificial y estudios de yacimientos, que complementó la información documental. Con el presente trabajo se propone una Metodología para la determinación de una familia de criterios en la selección de sistemas de Levantamiento Artificial, que le permita a la industria el logro de los objetivos de explotación de cada pozo de la manera más productiva, a los más bajos costos. En esta investigación se realizó una evaluación de los diferentes Sistemas de Levantamiento Artificial empleados por la industria petrolera, en la unificación de criterios en el proceso señalado y se planteó la metodología indicada, así como también, los diferentes procedimientos, programas o paquetes de computación usados para la selección de los sistemas de levantamiento.

**Palabras Claves:** Criterios, Jerarquización, Curvas de Valoración, Preferencias.

## LISTADO DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

%W	CORTE DE AGUA
$\Delta P$ :	DIFERENCIA DE PRESIÓN
API:	AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE
BCP:	BOMBA DE CAVIDAD PROGRESIVA
BES:	BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE
BH:	BOMBEO HIDRÁULICO
BM:	BOMBEO MECÁNICO
D:	PROFUNDIDAD
EDT:	ESTRUCTURA DESAGREGADA DE TRABAJO
EI:	EFICIENCIA DE LA INVERSIÓN
FPO:	FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO
IP:	ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD
LAG:	LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR GAS
MET:	MATRIZ DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA
MSOLA:	METODOLOGÍA DE SELECCIÓN ÓPTIMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL
MSOLM:	MODELO DE SELECCIÓN ÓPTIMA DE LAGO DE MARACAIBO
$^{\circ}$ API:	GRAVEDAD API
PAJ:	PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO
Pb:	PRESIÓN DE BURBUJEO
Pe:	PRESIÓN ESTÁTICA
PEP:	PLANES DETALLADOS DE EJECUCIÓN
Pwf:	PRESIÓN DE FONDO FLUYENTE
Q:	TASA DE LIQUIDO
RGL:	RELACIÓN GAS LIQUIDO
RGP:	RELACIÓN GAS PETRÓLEO
SEDLA:	SISTEMA EXPERTO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL
SIT:	SISTEMA DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA
SLA:	SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL
T:	TEMPERATURA
TIR:	TASA INTERNA DE RETORNO
VPN:	VALOR PRESENTE NETO

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	8
<b>1. CAPITULO I: EL PROBLEMA</b> .....	10
1.1 Planteamiento del Problema de la Investigación.....	10
1.2 Formulación del Problema.....	13
1.3 Objetivos de la Investigación.....	13
1.4 Alcances y Limitaciones de la Investigación .....	14
1.5 Justificación e Importancia.....	14
1.6 Modalidad Seleccionada .....	15
<b>2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	16
2.1 Consideraciones Generales .....	16
2.2 Proyecto.....	18
2.2.1 La Gerencia de Proyectos.....	19
2.2.2 Ciclo de vida del proyecto.....	19
2.2.2.1 Características del ciclo de vida del proyecto.....	19
2.2.3 Fases del proyecto .....	21
2.2.4 Procesos de la Gerencia de Proyectos para un Proyecto.....	22
2.2.4.1 Grupo del Proceso de Iniciación.....	24
2.2.4.2 Grupo del Proceso de Planificación.....	24
2.2.4.3 Grupo del Proceso de Ejecución.....	25
2.2.4.4 Grupo del Proceso de Seguimiento y Control.....	26
2.2.4.5 Grupo del Proceso de Cierre.....	27
2.3 Criterios para Seleccionar Sistemas de Levantamiento Artificial (SLA).....	27
2.3.1 Definición.....	28
2.3.2 Determinación de Criterios.....	31
2.3.3 Técnicas para la Generación de Criterios.....	34
2.3.3.1 Interacción.....	37
2.3.3.2 Tormenta o Lluvia de Ideas.....	37
2.3.3.3 Comités.....	38
2.3.3.4 Método Sinéctico.....	38
2.3.3.5 Método Delphi.....	39
2.3.3.6 Método K – J.....	40
2.3.3.7 Árbol de Decisiones.....	41
2.3.3.8 Reuniones Electrónicas.....	42
2.3.3.9 Diagramas Causa-Efecto.....	42
2.3.4 Jerarquización de los Criterios.....	44
2.3.5 Proceso Analítico Jerárquico.....	45
2.3.6 Medición de los Criterios a través de Curvas de Valoración.....	52
2.4 Determinación de Preferencias de un Sistema de Levantamiento Artificial	56
2.5 Sistemas de Levantamiento Artificial (SLA).....	57
2.5.1 Sistema de Bombeo Mecánico.....	58
2.5.2 Sistema de Bombeo Electrosumergible.....	61

2.5.3	Bomba de Cavidad Progresiva.....	65
2.5.4	Bombeo Hidráulico.....	68
2.5.5	Levantamiento Artificial por Gas.....	71
2.6	Modelos de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial.....	75
2.6.1	Matriz de Evaluación Tecnológica.....	75
2.6.2	Sistema Experto de Levantamiento Artificial.....	79
2.6.2.1	Análisis del Sistema Experto de Levantamiento Artificial.....	83
2.6.3	Metodología de Selección Óptima de Levantamiento Artificial.....	84
2.7	Criterios que Afectan la Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial.....	86
2.7.1	Comportamiento de Afluencia.....	86
2.7.2	Tasa de Producción de Líquido.....	86
2.7.3	Temperatura de Fondo.....	87
2.7.4	Relación Gas / Líquido.....	88
2.7.4.1	La relación Gas - Líquido de Formación.....	88
2.7.4.2	La relación Gas Libre a la Entrada de la Bomba.....	89
2.7.5	Corte de Agua.....	90
2.7.6	Viscosidad y Gravedad API (°API).....	91
2.7.7	Profundidad.....	92
2.7.8	Diámetro del Revestidor.....	94
2.7.9	Diámetro del Eductor.....	95
2.7.10	La Producción de Arenas.....	96
2.7.11	Parafina y Asfáltenos.....	96
2.7.12	Escamas.....	97
2.7.13	Corrosión.....	97
2.7.14	Emulsiones.....	97
2.7.15	Grado de Desviación del Hoyo.....	98
2.7.16	Pericia de Campo.....	98
2.7.17	Localización del Pozo.....	98
2.7.18	Yacimientos con Empuje por Depleción.....	99
2.7.19	Yacimientos con Empuje por Expansión de la Capa de Gas.....	99
2.7.20	Yacimientos con Empuje Hidráulico.....	100
2.7.21	Yacimientos de Crudos Espumantes.....	100
2.7.22	Presiones en el Yacimiento.....	100
2.7.23	Índice de Productividad.....	101
<b>3.</b>	<b>CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>103</b>
3.1	Generalidades .....	103
3.2	Tipo y Diseño de la Investigación .....	103
3.3	Población y Muestra .....	104
3.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	104
3.5	Confiabilidad y Validez .....	106
3.6	Técnicas de Análisis .....	106
3.7	Matriz Metodológica .....	107

<b>4. CAPITULO IV: VENTANA DE MERCADO .....</b>	<b>108</b>
<b>5. CAPITULO V: DISEÑO Y DESARROLLO DEL PRODUCTO O SERVICIO..</b>	<b>111</b>
5.1 Objetivos y Propósitos del Proyecto.....	111
5.1.1 Objetivos.....	111
5.1.1.1 General.....	111
5.1.1.2 Específicos .....	111
5.1.2 Propósitos.....	111
5.2 Descripción del Alcance.....	112
5.3 Estructura Desagregada de Trabajo (EDT).....	114
5.4 Entregables del Proyecto .....	115
5.4.1 Fase Planificación.....	115
5.4.2 Fase Ejecución.....	115
5.4.3 Fase de Seguimiento y Control.....	115
5.4.4 Fase de Cierre.....	115
5.5 Estrategias Consideradas.....	115
5.6 Recomendaciones.....	120
5.7 Análisis de Riesgos (Matriz Simplificada).....	120
5.8 Guías para el Control del Proyecto.....	121
5.9 Estrategia de Ejecución.....	121
5.9.1 Constitución de un equipo de trabajo.....	121
5.9.2 Generación de criterios.....	121
5.9.3 Construcción de una jerarquía.....	122
5.9.4 Construcción de los modelos de preferencias.....	123
5.9.4.1 Determinación de las preferencias sobre un SLA.....	123
5.10 Planes Detallados de Ejecución (PEP).....	124
5.10.1 Definición del problema.....	125
5.10.2 Generación de lista de criterios.....	125
5.10.3 Descarte de Criterios .....	127
5.10.4 Estructuración de criterios.....	128
5.11 Cronograma detallado del plan ejecución del proyecto.....	131
<b>6. CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>132</b>
<b>7. CAPITULO VII: EVALUACIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>158</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>160</b>
<b>REFERENCIAS BLIOGRAFICAS.....</b>	<b>163</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>165</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Niveles típicos de costo y dotación de personal durante el ciclo de vida del proyecto.....	20
2.2	Impacto de la variable en función del tiempo del proyecto.....	21
2.3	Grupo de procesos de la gerencia de proyectos.....	23
2.4	Los Criterios Dentro de las Estrategia de la Empresa.....	29
2.5	Los criterios dentro del pensamiento estratégico.....	30
2.6	Diagrama de Espina de Pescado.....	43
2.7	Curva de Valoración Tipo.....	54
2.8	Instalación Típica de Bombeo Mecánico.....	58
2.9	Instalación típica de bombeo electro-sumergible.....	67
2.10	Instalación Típica de la Bomba de Cavidad Progresiva.....	66
2.11	Completación Típica de LAG.....	71
2.12	Esquema del módulo de preselección.....	81
2.13	Esquema del modulo de evaluación económica.....	82
5.1	Representación de una jerarquía típica.....	122
5.2	Definición del problema.....	125
5.4	Generación de la lista de criterios.....	126
5.6	Descarte de criterios.....	128
5.7	Estructuración de Criterios.....	129
5.8	Metodología para Selección de Criterios.....	130

## ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Ventajas y Desventajas de una Decisión en Grupo.....	35
2.2	Interpretación de elementos de una matriz de comparaciones por pares.....	46
2.3	Índices aleatorios promedios.....	50
2.4	Las situaciones fundamentales de preferencia y relaciones binarias Asociadas.....	53
2.5	Escala de calificación para la obtención de las curvas de valoración.....	55
3.1	Relación de las preguntas del cuestionario con los objetivos específicos.....	105
3.2	Matriz metodológica.....	107
5.1	Comparaciones entre los Diferentes Modelos de Tomas de Decisiones.....	117
5.2	Comparaciones entre los Diferentes Métodos para la Jerarquización y determinación de Pesos.....	119

## INTRODUCCIÓN

Cuando la energía natural de un yacimiento se agota, se hace necesaria la utilización de un sistema de levantamiento artificial para elevar los fluidos a la superficie y la planificación de los sistemas de levantamiento es de suma importancia para alcanzar de manera eficiente y óptima la explotación de un yacimiento de petrolero.

La selección del Sistema de Levantamiento está influenciada por los diversos criterios presentes en un pozo por lo que en este trabajo se propone una metodología para seleccionar cuales de estos criterios influyen verdaderamente en la escogencia del sistema de levantamiento y de esta manera determinar las preferencias que tiene ese pozo a que se implemente un determinado sistema de levantamiento artificial para una explotación óptima y adecuada.

Con la finalidad de cumplir con los objetivos establecidos en esta investigación, se estructuró este trabajo en siete capítulos de la siguiente manera:

Capítulo I, que contiene la formulación del problema exponiendo los aspectos más importantes que lo caracterizan y al mismo tiempo formulado una serie de preguntas cuyas respuestas deben ser obtenidas una vez realizada la investigación. Así mismo, se presentan los objetivos de la investigación, su alcance y limitaciones y finalmente la importancia de la misma.

Capítulo II, se presentan los antecedentes para relevantes relacionados con la investigación planteada en este trabajo y las bases teóricas más importantes que sustentan el desarrollo del mismo; las cuales están centradas principalmente en aspectos técnicos relacionados con los diversos conceptos y teorías que tratan el tema de levantamiento artificial de petróleo, y los aspectos más relevantes con la teoría sobre gerencia de proyectos, específicamente aquella que se refiera a los tópicos de visualización, conceptualización y definición de proyectos, que conforman los tópicos de interés para el desarrollo de este trabajo.

Capítulo III, en el cual se exponen los aspectos relacionados con la metodología utilizada para desarrollar esta investigación, a saber: tipo y diseño de la

investigación, población y muestra, técnicas de recolección de datos y análisis de los mismos y finalmente la matriz metodológica.

Capítulo IV, donde se exponen los aspectos más importantes sobre la ventana de mercado para este proyecto.

Capítulo V, contiene la propuesta metodológica con la familia de criterios más importantes arrojados de la investigación.

Capítulo VI, se presenta la propuesta de proyecto con las diferentes fases y sus respectivos alcances que muestra el cómo se realizó esta investigación.

Capítulo VII, contiene los aspectos relevantes sobre el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones arrojadas de la investigación y la bibliografía que se consultó para realizar este Trabajo Especial de Grado.

## **CAPITULO I**

### **EL PROBLEMA**

En este capítulo se plantea el problema de la investigación ubicándolo primero en un contexto amplio y luego delimitándolo al caso de estudio, y se formula el objetivo general y los objetivos específicos de la misma, se justifica la investigación, además se presentan los alcances y limitaciones que se perfilan en esta, y se incluye la modalidad de investigación a ser aplicada en el desarrollo del trabajo.

#### **1.1 Planteamiento del Problema de la Investigación**

En los yacimientos los fluidos están sujetos a la acción de varias fuerzas y energías naturales: fuerzas de presión, fuerzas de fricción por viscosidad, de gravedad de energía y fuerzas capilares, las cuales actúan en el movimiento de los fluidos hacia los pozos o para retenerlos en el yacimiento.

Cuando esas energías son suficientes para promover el desplazamiento de los fluidos desde su interior hasta el fondo del pozo y de allí a la superficie, se dice que "EL POZO FLUYE NATURALMENTE", es decir, el fluido se desplaza como consecuencia del diferencial de presión entre la formación y el pozo.

La Producción por Flujo Natural no es el método que garantiza los niveles de producción rentables durante toda la vida productiva del yacimiento.

Para obtener el máximo beneficio económico del yacimiento, es necesario seleccionar el método de producción óptimo, este es el que permite mantener los niveles de producción de la manera más económica posible.

Al realizar la explotación del yacimiento la presión de este disminuye, lo que implica que la producción de fluidos baje hasta el momento en el cual, el pozo deja de producir por sí mismo. De allí surge la necesidad de extraer los fluidos del

yacimiento mediante la aplicación de fuerzas o energías ajenas al pozo, de aquí surge lo que llamamos Levantamiento Artificial.

La mayoría de los pozos son capaces de producir por Flujo Natural en la primera etapa de su vida productiva, no obstante una vez finalizada la producción por Flujo Natural, es necesario seleccionar un Método de Levantamiento Artificial que permita seguir produciendo eficientemente el yacimiento.

Al realizar la explotación del yacimiento la presión de este disminuye lo que implica que la producción baje hasta el momento en el cual el pozo deja de producir por sí mismo.

El Método de Levantamiento Artificial consiste en extraer los fluidos del yacimiento mediante la aplicación de fuerzas o energías ajenas al pozo.

En Venezuela los Programas Masivos de Explotación Petrolera han ocasionado una disminución de las presiones de los yacimientos en los diferentes campos, esto trae como consecuencia el uso intensivo de los Sistemas de Levantamiento Artificial.

Hasta mediados de los años 1980 - 1990 los Sistemas de Levantamiento Artificial fueron: El Bombeo Mecánico Convencional para crudos pesados y El Levantamiento Artificial por Gas para crudos livianos y medianos. Fue hasta finales de esta década que comienza la aplicación en el campo de métodos no convencionales como son los Sistemas de Bombas Electrosomergibles, Bombas de Cavidad Progresiva y otros esfuerzos de Levantamiento Artificial por Gas, específicamente en la inyección intermitente con sus diversas modalidades.

Durante la última década del siglo pasado en Venezuela, el porcentaje de pozos produciendo bajo Sistemas de Levantamiento Artificial estuvo entre 87% hasta llegar al 96%, con un aporte del 78% de la producción total de petróleo (PDVSA, 2001).

Es indudable la importancia de los Sistemas de Levantamiento Artificial, por lo tanto, se hace imperante la necesidad de tomar decisiones cada vez más

acertadas y en consecuencia una eficiente selección de los mismos adaptables a las necesidades de nuestros campos petroleros.

Los criterios que inciden en los Sistemas de Levantamiento Artificial son un número importante de variables las cuales deben ser analizadas, desglosadas, evaluadas y comparadas y donde muchos de ellos están vinculados con el área de Ingeniería de Producción, pero otros son altamente relevantes en el área de Ingeniería de Yacimientos. Para la optimización de la tasa de producción a través de los Sistemas de Levantamiento Artificial, se hace necesario la recopilación de toda la data existente pertinente a la perforación, completación y producción del pozo, así como también ciertas características del yacimiento.

El tipo de levantamiento requerido puede ser influenciado de acuerdo a la data recopilada, en consecuencia la selección de Sistema de Levantamiento Artificial puede ser determinada no por diseños óptimos sino por limitaciones físicas o criterios económicos. Es por ello que la Planificación en el Levantamiento Artificial, es fundamental desde la misma perforación del pozo.

La existencia de más de un Sistema de Levantamiento Artificial aplicable a cada pozo permite que puedan ser clasificados desde excelentes hasta pobres. Dependiendo sobre todo de las condiciones económicas, el Sistema de levantamiento seleccionado será el que satisfaga el mayor número de criterios.

Kermit Brown (1980), pionero en esta área del conocimiento esboza lo concerniente a la planificación para la selección del Sistema de Levantamiento Artificial, plantea en su trabajo que en la selección del tipo de sistema de levantamiento influyen una serie de factores entre los cuales están: las completaciones de pozos, las características de producción, las características de hoyo y las características del yacimiento.

Previamente Johnson (1968) elaboró una tabla comparativa y en base a la experiencia de campo, con los problemas más comunes que afectan la selección de un sistema de levantamiento los cuales se pueden considerar criterios

secundarios que incidirán en la selección del sistema de levantamiento apropiado, como una función de la vida útil del pozo.

La tendencia dominante en el sector petrolero nacional es la selección del Sistema de Levantamiento que mejor se adapte a cada pozo y que procure la menor inversión y los mínimos costos de producción para de esta forma pueda rendir el mayor beneficio, que en el contexto económico actual del país constituyen el marco de la presente investigación.

En tal sentido se seleccionaron cinco de los Sistemas de Levantamiento más usados en la actualidad, y los últimos tres de los modelos de selección para su evaluación y estudio.

## **1.2 Formulación del Problema.**

De acuerdo a los planteamientos descritos y con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos, se presentan las siguientes interrogantes:

¿Cómo influye una buena selección de criterios para la optimización de los Sistemas de Levantamiento Artificial?

¿Qué Sistemas de levantamiento Artificial constituyen la alternativa más eficiente en la explotación de los campos petroleros?

¿Cuáles son las limitaciones tecnológicas que presentan los Sistemas de Levantamiento Artificial ante la presencia de criterios que afectan su funcionamiento?

¿Son los modelos de selección una herramienta útil en la escogencia óptima de los Sistemas de Levantamiento Artificial?

## **1.3 Objetivos de la Investigación.**

### **Objetivo General:**

Diseñar una Metodología en la determinación de una familia de criterios para la selección de Sistemas de Levantamiento Artificial en el área de hidrocarburos.

### **Objetivos Específicos:**

1. Diagnosticar la situación actual de los criterios de selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial.
2. Realizar un análisis matricial interno-externo de los sistemas de levantamiento artificial utilizados por la industria petrolera para tal fin y para la detección de su eficacia y su eficiencia.
3. Analizar los distintos modelos diseñados para la selección de los sistemas de levantamiento artificial.
4. Realizar un estudio sobre los distintos criterios que pueden afectar la selección de los sistemas de levantamiento artificial.
5. Desarrollar la metodología

### **1.4 Alcances y limitaciones de la Investigación**

Con el presente trabajo se intenta proponer una metodología para la determinación de una familia de criterios en la selección de sistemas de Levantamiento Artificial, que le permita a la industria el logro de los objetivos de explotación de cada pozo de la manera más productiva, a los más bajos costos.

En esta investigación se pretende realizar una evaluación de los diferentes Sistemas de Levantamiento Artificial empleados por la industria petrolera, en la unificación de criterios en el proceso señalado para proponer la metodología antes señalada, así como también, los diferentes procedimientos, programas o paquetes de computación usados para la selección de los sistemas de levantamiento.

### **1.5 Justificación e Importancia.**

Para la Industria Petrolera la necesidad e importancia de esta investigación radica en que uno de los objetivos fundamentales de cualquier compañía petrolera es optimizar la producción de petróleo, por lo que se hace imprescindible, que se disponga de una metodología que permita seleccionar los factores que influyen en los Sistemas de Levantamiento Artificial, para de esta forma coadyuvar a la mejor selección de los mismos y así optimizar la producción del crudo.

Esta investigación es factible para el investigador porque dispone de los recursos bibliográficos, documentales, técnicos y materiales que servirán de apoyo para la realización de la misma de manera eficiente.

### **1.6 Modalidad Seleccionada.**

Siguiendo los lineamientos establecidos por la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB) para la elaboración del presente Trabajo Especial de Grado, la modalidad de investigación seleccionada, es la de investigación Documental Bibliográfica, entendiéndose por esto,

*“...El estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo principalmente, en fuentes bibliográficas, documentales y estadísticas. La originalidad del estudio se refleja en el enfoque, criterios, conceptualizaciones, conclusiones, recomendaciones y en general en el pensamiento del autor.” (UPEL, 2008, p.6)*

Además es un estudio de campo porque se le administrará un cuestionario a especialistas en el área de ingeniería, específicamente a aquel personal entrenado en lo referente a Sistemas de Levantamiento Artificial y estudios de yacimientos, para complementar la información documental

Los objetivos del estudio propuesto y la disciplina en las cuales se ubica la temática de este trabajo de investigación, con base documental bibliográfica se encuentra en el campo de la Gerencia de Proyectos y de la Ingeniería de Petróleo específicamente en las áreas de visualización, conceptualización y definición de proyectos y de la producción y explotación del crudo.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Consideraciones Generales**

El Marco Teórico de la Investigación o Marco Referencial, se define como un compendio de una serie de elementos conceptuales que sirven de base a la indagación por realizar (Arias, 1999).

Una vez citado el planteamiento del problema, y definidos los objetivos (el general y los específicos), los cuales determinan los fines de la investigación es necesario señalar los aspectos teóricos sobre la Gerencia de Proyectos desde la visualización hasta la definición del proyecto, los distintos Sistemas y Modelos de Selección de Levantamiento Artificial y los Criterios que los afectan, que sustentarán el estudio en referencia.

En esta parte de la investigación, se plantean en primer lugar las definiciones en el área de la gerencia de proyectos, para luego detallar las consideraciones generales sobre los criterios, seguidamente se hace referencia sobre los sistemas de levantamiento artificial y los modelos que permiten su selección y al final se hace un análisis descriptivo de los diferentes Criterios que afectan la selección de los mismos.

#### **2.2 Proyecto**

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único, (PMBOK, 2008). La naturaleza temporal de los proyectos indica un principio y un final definidos. El final se alcanza cuando se logran los objetivos del proyecto o cuando se termina el proyecto porque sus objetivos no se cumplirán o no pueden ser cumplidos, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al proyecto. Temporal no necesariamente significa de corta duración. En general, esta cualidad no se aplica al producto, servicio o resultado creado por el proyecto; la mayor parte de los proyectos se emprenden para crear un resultado duradero. Por ejemplo, un proyecto para construir un

monumento nacional creará un resultado que se espera que perdure durante siglos. Por otra parte, los proyectos pueden tener impactos sociales, económicos y ambientales que durarán mucho más que los propios proyectos.

Todo proyecto crea un producto, servicio o resultado único. Aunque puede haber elementos repetitivos en algunos entregables del proyecto, esta repetición no altera la unicidad fundamental del trabajo del proyecto. Por ejemplo, los edificios de oficinas son construidos con materiales idénticos o similares, o por el mismo equipo, pero cada ubicación es única: con un diseño diferente, en circunstancias diferentes, por contratistas diferentes, etcétera.

Un esfuerzo de trabajo permanente es por lo general un proceso repetitivo, puesto que sigue los procedimientos existentes de una organización. En contraposición, debido a la naturaleza única de los proyectos, puede existir incertidumbre respecto de los productos, servicios o resultados que el proyecto genera. Las tareas del proyecto pueden ser nuevas para el equipo del proyecto, lo que hace necesario planificar con mayor dedicación que si se tratara de un trabajo de rutina. Además, los proyectos se llevan a cabo en todos los niveles de una organización. Un proyecto puede involucrar a una sola persona, una sola unidad o múltiples unidades dentro de la organización.

Un proyecto puede generar:

- Un producto que puede ser un componente de otro elemento o un elemento final en sí mismo,
- La capacidad de realizar un servicio (por ej., una función comercial que brinda apoyo a la producción o distribución), o
- Un resultado tal como un producto o un documento (por ej., un proyecto de investigación que desarrolla conocimientos que se pueden emplear para determinar si existe una tendencia o si un nuevo proceso beneficiará a la sociedad). (PMBOK, 2008).

### **2.2.1 La Gerencia de Proyectos**

La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo. Se logra mediante la aplicación e integración adecuadas de los 42 procesos de la dirección de proyectos, agrupados lógicamente, que conforman los 5 grupos de procesos. Estos 5 grupos de procesos son:

- Iniciación,
- Planificación,
- Ejecución,
- Seguimiento y Control, y
- Cierre.

Dirigir un proyecto por lo general implica:

- Identificar requisitos,
- Abordar las diversas necesidades, inquietudes y expectativas de los interesados según se planifica y efectúa el proyecto,
- Equilibrar las restricciones contrapuestas del proyecto que se relacionan, entre otros aspectos, con:
  - ✓ El Alcance,
  - ✓ La Calidad,
  - ✓ El Cronograma,
  - ✓ El Presupuesto,
  - ✓ Los Recursos y
  - ✓ El Riesgo.

El proyecto específico influirá sobre las restricciones en las que el director del proyecto necesita concentrarse.

La relación entre estos factores es tal que si alguno de ellos cambia, es probable que al menos otro se vea afectado. Por ejemplo, un adelanto en el cronograma a menudo implica aumentar el presupuesto, a fin de añadir recursos adicionales para completar la misma cantidad de trabajo en menos tiempo. Si no es posible

aumentar el presupuesto, se puede reducir el alcance o la calidad, para entregar un producto en menos tiempo por el mismo presupuesto. Los interesados en el proyecto pueden tener opiniones diferentes sobre cuáles son los factores más importantes, lo que crea un desafío aún mayor. Cambiar los requisitos del proyecto puede generar riesgos adicionales. El equipo del proyecto debe ser capaz de evaluar la situación y equilibrar las demandas a fin de entregar un proyecto exitoso (PMBOK, 2008).

Dada la posibilidad de sufrir cambios, el plan para la dirección del proyecto es iterativo y su elaboración es gradual a lo largo del ciclo de vida del proyecto. La elaboración gradual implica mejorar y detallar constantemente un plan, a medida que se cuenta con información más detallada y específica, y con estimados más precisos. La elaboración gradual permite a un equipo de dirección del proyecto dirigir el proyecto con un mayor nivel de detalle a medida que éste avanza.

## **2.2 2 Ciclo de vida del proyecto**

El ciclo de vida del proyecto es un conjunto de fases del mismo, generalmente secuenciales y en ocasiones superpuestas, cuyo nombre y número se determinan por las necesidades de gestión y control de la organización u organizaciones que participan en el proyecto, la naturaleza propia del proyecto y su área de aplicación. Un ciclo de vida puede documentarse con ayuda de una metodología. El ciclo de vida del proyecto puede ser determinado o conformado por los aspectos únicos de la organización, de la industria o de la tecnología empleada. Mientras que cada proyecto tiene un inicio y un final definidos, los entregables específicos y las actividades que se llevan a cabo entre éstos variarán ampliamente de acuerdo con el proyecto. El ciclo de vida proporciona el marco de referencia básico para dirigir el proyecto, independientemente del trabajo específico involucrado (PMBOK, 2008).

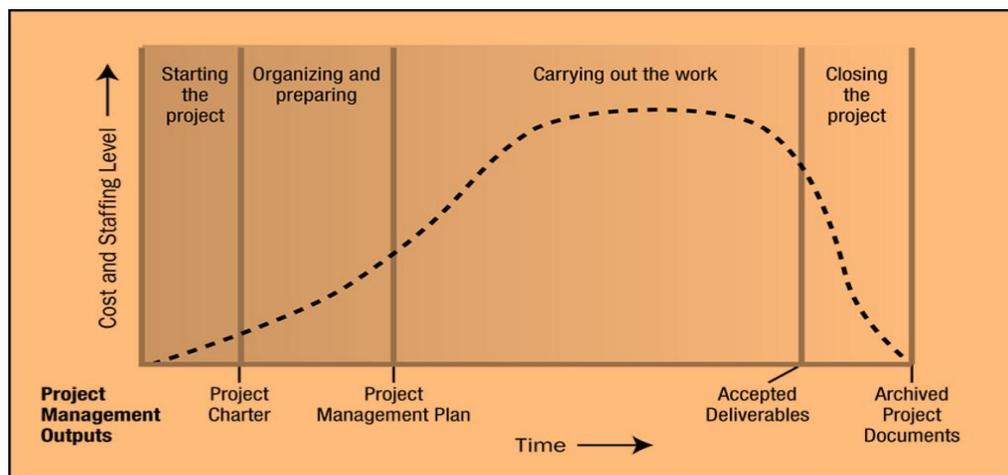
### **2.2.2.1 Características del ciclo de vida del proyecto**

Los proyectos varían en tamaño y complejidad. Todos los proyectos, sin importar cuán pequeños o grandes, o cuán sencillos o complejos sean, pueden

configurarse dentro de la siguiente estructura del ciclo de vida (véase la figura 2.1):

- Inicio,
- Organización y preparación,
- Ejecución del trabajo y
- Cierre.

A menudo se hace referencia a esta estructura genérica del ciclo de vida durante las comunicaciones con la alta dirección u otras entidades menos familiarizadas con los detalles del proyecto. Esta perspectiva general puede proporcionar un marco de referencia común para comparar proyectos, incluso si son de naturaleza diferente.

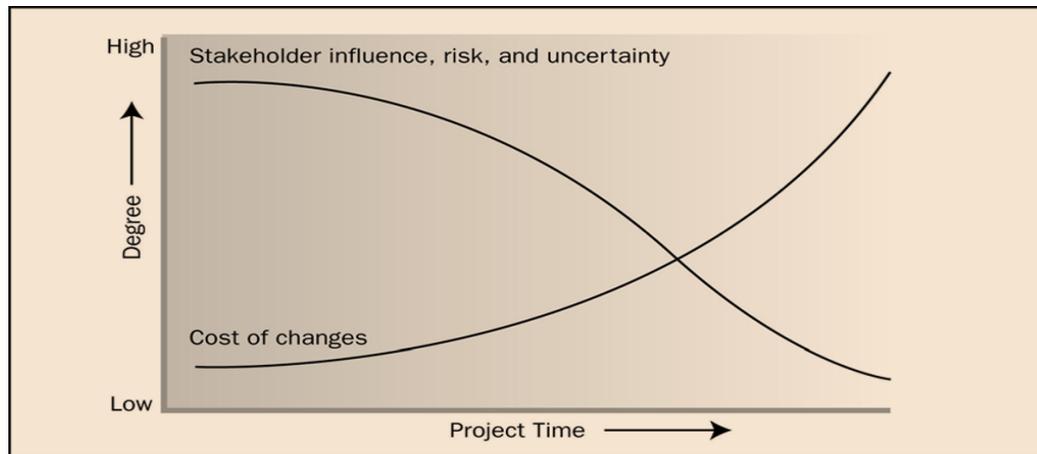


**Figura 2-1.** Niveles típicos de costo y dotación de personal durante el ciclo de vida del proyecto. PMBOK (2008).

La estructura genérica del ciclo de vida presenta por lo general las siguientes características:

- Los niveles de costo y dotación de personal son bajos al inicio del proyecto, alcanzan su punto máximo según se desarrolla el trabajo y caen rápidamente cuando el proyecto se acerca al cierre. Este patrón típico está representado en la figura 2-1 por la línea punteada.
- La influencia de los interesados, al igual que los riesgos y la incertidumbre (según ilustrado en la figura 2-2) son mayores al inicio del proyecto. Estos factores disminuyen durante la vida del proyecto.

- La capacidad de influir en las características finales del producto del proyecto, sin afectar significativamente el costo, es más alta al inicio del proyecto y va disminuyendo a medida que el proyecto avanza hacia su conclusión. La figura 2-2 ilustra la idea de que el costo de los cambios y de corregir errores suele aumentar sustancialmente según el proyecto se acerca a su fin.



**Figura 2-2.** Impacto de la variable en función del tiempo del proyecto. PMBOK (2008).

Dentro del contexto de la estructura genérica del ciclo de vida, un director del proyecto puede determinar la necesidad de un control más efectivo sobre ciertos entregables. En particular, los proyectos grandes y complejos pueden requerir este nivel adicional de control. En tales casos, el trabajo desarrollado para cumplir con los objetivos del proyecto puede verse beneficiado por la división formal en fases.

### 2.2.3 Fases del proyecto

Las fases del proyecto son divisiones dentro del mismo proyecto, donde es necesario ejercer un control adicional para gestionar eficazmente la conclusión de un entregable mayor. Las fases del proyecto suelen completarse de manera secuencial, pero en determinadas situaciones de un proyecto pueden superponerse. Por su naturaleza de alto nivel, las fases del proyecto constituyen un elemento del ciclo de vida del proyecto. Una fase del proyecto no es un grupo de procesos de dirección de proyectos.

La estructuración en fases permite la división del proyecto en subconjuntos lógicos para facilitar su dirección, planificación y control. El número de fases, la necesidad de establecer fases y el grado de control aplicado dependen del tamaño, la complejidad y el impacto potencial del proyecto. Independientemente de la cantidad de fases que compongan un proyecto, todas ellas poseen características similares:

- Cuando las fases son secuenciales, el cierre de una fase termina con cierta forma de transferencia o entrega del trabajo producido como el entregable de la fase. La terminación de esta fase representa un punto natural para re-evaluar el esfuerzo en curso y, en caso de ser necesario, para cambiar o terminar el proyecto. Estos puntos se conocen como salidas de fase, hitos, puertas de fase, puntos de decisión, puertas de etapa o puntos de cancelación.
- El trabajo tiene un enfoque único que difiere del de cualquier otra fase. Esto involucra a menudo diferentes organizaciones y conjuntos de habilidades.
- Para alcanzar con éxito el objetivo o entregable principal de la fase, se requiere un grado adicional de control. Como se describe en el Capítulo 3, la repetición de procesos a través de los cinco grupos de procesos proporciona ese grado adicional de control y define los límites de la fase.

#### **2.2.4 Procesos de la Gerencia de Proyectos para un Proyecto**

Un proceso es un conjunto de acciones y actividades interrelacionadas realizadas para obtener un producto, resultado o servicio predefinido. Cada proceso se caracteriza por sus entradas, por las herramientas y técnicas que puedan aplicarse y por las salidas que se obtienen.

El gerente del proyecto debe considerar los activos de los procesos de la organización y los factores ambientales de la empresa. Éstos se deben tener en cuenta para cada proceso, incluso si no están enumerados de manera explícita como entradas en las especificaciones del proceso. Los activos de los procesos de la organización proporcionan pautas y criterios para adaptar dichos procesos a

las necesidades específicas del proyecto. Los factores ambientales de la empresa pueden restringir las opciones de la dirección de proyectos.

Para que un proyecto tenga éxito, el equipo del proyecto debe:

- seleccionar los procesos adecuados requeridos para alcanzar los objetivos del proyecto,
- utilizar un enfoque definido que pueda adoptarse para cumplir con los requisitos,
- cumplir con los requisitos a fin de satisfacer las necesidades y expectativas de los interesados.
- equilibrar las demandas contrapuestas relativas al alcance, tiempo, costo, calidad, recursos y riesgo para producir el producto, servicio o resultado especificado.

Los procesos de la gerencia de proyectos se agrupan en cinco categorías conocidas como Grupos de Procesos de la Gerencia de Proyectos (o grupos de procesos ilustrados en la figura 2-3):

- **Grupo del Proceso de Iniciación.**
- **Grupo del Proceso de Planificación.**
- **Grupo del Proceso de Ejecución.**
- **Grupo del Proceso de Seguimiento y Control.**
- **Grupo del Proceso de Cierre.**



**Figura 2-3:** Grupo de procesos de la gerencia de proyectos. PMBOK (2008).

#### **2.2.4.1 Grupo del Proceso de Iniciación**

El Grupo del Proceso de Iniciación está compuesto por aquellos procesos realizados para definir un nuevo proyecto o una nueva fase de un proyecto ya existente, mediante la obtención de la autorización para comenzar dicho proyecto o fase. Dentro de los procesos de iniciación, se define el alcance inicial y se comprometen los recursos financieros iniciales. Se identifican los interesados internos y externos que van a interactuar y ejercer alguna influencia sobre el resultado global del proyecto. Si aún no fue nombrado, se seleccionará el director del proyecto. Esta información se plasma en el acta de constitución del proyecto y registro de interesados. Cuando el acta de constitución del proyecto recibe aprobación, el proyecto se considera autorizado oficialmente. Aunque el equipo de dirección del proyecto pueda colaborar en la redacción de esta acta, la aprobación y el financiamiento se manejan fuera de los límites del proyecto

#### **2.2.4.2 Grupo del Proceso de Planificación**

El Grupo del Proceso de Planificación está compuesto por aquellos procesos realizados para establecer el alcance total del esfuerzo, definir y refinar los objetivos, y desarrollar la línea de acción requerida para alcanzar dichos objetivos. Los procesos de planificación desarrollan el plan para la dirección del proyecto y los documentos del proyecto que se utilizarán para llevarlo a cabo. La naturaleza multidimensional de la dirección de proyectos genera bucles de retroalimentación repetidos que permiten un análisis adicional. A medida que se recopilan o se comprenden más características o informaciones sobre el proyecto, puede ser necesaria una mayor planificación. Los cambios importantes que ocurren a lo largo del ciclo de vida del proyecto generan la necesidad de reconsiderar uno o más de los procesos de planificación y, posiblemente, algunos de los procesos de iniciación. Esta incorporación progresiva de detalles al plan para la dirección del proyecto recibe generalmente el nombre de “planificación gradual”, para indicar que la planificación y la documentación son procesos repetitivos y continuos.

El plan para la dirección del proyecto y los documentos del proyecto desarrollados como salidas del grupo de procesos de planificación, explorarán todos los aspectos del alcance, tiempo, costos, calidad, comunicación, riesgos y adquisiciones. Las actualizaciones que surgen de los cambios aprobados durante el proyecto pueden tener un impacto considerable en partes del plan para la dirección del proyecto y en los documentos del proyecto. Estas actualizaciones a los documentos aportan mayor precisión en torno al cronograma, costos y requisitos de recursos a fin de cumplir con el alcance definido del proyecto.

#### **2.2.4.3 Grupo del Proceso de Ejecución**

El Grupo del Proceso de Ejecución está compuesto por aquellos procesos realizados para completar el trabajo definido en el plan para la dirección del proyecto a fin de cumplir con las especificaciones del mismo. Este grupo de proceso implica coordinar personas y recursos, así como integrar y realizar las actividades del proyecto de conformidad con el plan para la dirección del proyecto

Durante la ejecución del proyecto, los resultados pueden requerir que se actualice la planificación y que se vuelva a establecer la línea base. Esto puede incluir cambios en la duración prevista de las actividades, cambios en la disponibilidad y productividad de recursos, así como en los riesgos no anticipados. Tales variaciones pueden afectar el plan para la dirección del proyecto o los documentos del proyecto, y pueden requerir un análisis detallado y el desarrollo de respuestas de dirección de proyectos apropiadas. Los resultados del análisis pueden generar la solicitud de cambios que, en caso de ser aprobados, podrían modificar el plan para la dirección del proyecto u otros documentos del proyecto, y requerir posiblemente el establecimiento de una nueva línea base. Gran parte del presupuesto del proyecto se utilizará en la realización de los procesos del grupo de procesos de ejecución. El grupo de procesos de ejecución incluye los siguientes procesos de dirección de proyectos

#### **2.2.4.4 Grupo del Proceso de Seguimiento y Control**

El grupo del Proceso de Seguimiento y Control está compuesto por aquellos procesos requeridos para supervisar, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes. El beneficio clave de este grupo de procesos radica en que el desempeño del proyecto se observa y se mide de manera sistemática y regular, a fin de identificar variaciones respecto del plan para la dirección del proyecto. El grupo de procesos de seguimiento y control también incluye:

- controlar cambios y recomendar acciones preventivas para anticipar posibles problemas,
- dar seguimiento a las actividades del proyecto, comparándolas con el plan para la dirección del proyecto y la línea base desempeño de ejecución del proyecto
- influir en los factores que podrían eludir el control integrado de cambios, de modo que únicamente se implementen cambios aprobados.

Este seguimiento continuo proporciona al equipo del proyecto conocimientos sobre la salud del proyecto y permite identificar las áreas que requieren más atención. Además de dar seguimiento y controlar el trabajo que se está realizando dentro de un grupo de proceso, este grupo de proceso da seguimiento y controla la totalidad del esfuerzo del proyecto. En proyectos de fases múltiples, el grupo de proceso de seguimiento y control coordina las fases del proyecto a fin de implementar acciones correctivas o preventivas, de modo que el proyecto cumpla con el plan para la dirección del proyecto. Esta revisión puede dar lugar a actualizaciones recomendadas y aprobadas al plan para la dirección del proyecto. Por ejemplo, el incumplimiento de una fecha de finalización de una actividad puede requerir ajustes al plan de personal vigente, la implementación de horas extra, o que se realicen concesiones entre los objetivos de presupuesto y cronograma.

#### **2.2.4.5 Grupo del Proceso de Cierre**

El Grupo del Proceso del Cierre está compuesto por aquellos procesos realizados para finalizar todas las actividades a través de todos los grupos de procesos de la dirección de proyectos, a fin de completar formalmente el proyecto, una fase del mismo u otras obligaciones contractuales.

Este grupo de procesos, una vez completado, verifica que los procesos definidos se hayan completado dentro de todos los grupos de procesos a fin de cerrar el proyecto o una fase del mismo, según corresponda, y establece formalmente que el proyecto o fase del mismo ha finalizado. En el cierre del proyecto o fase, puede ocurrir lo siguiente:

- Obtener la aceptación del cliente o del patrocinador,
- Realizar una revisión tras el cierre del proyecto o la finalización de una fase,
- Registrar los impactos de la adaptación a un proceso,
- Documentar las lecciones aprendidas,
- Aplicar actualizaciones apropiadas a los activos de los procesos de la organización,
- Archivar todos los documentos relevantes del proyecto en el sistema de información para la dirección de proyectos para ser utilizados como datos históricos y
- Cerrar las adquisiciones

#### **2.3 Criterios para Seleccionar Sistemas de Levantamiento Artificial**

Es evidente que ante cada problema de investigación se tengan diferentes referencia teóricas y conceptuales, por lo que el propósito del Marco Teórico es dar a la investigación una información coordinada y coherente de los distintos constructos epistemológicos relacionados con los Criterios que Influyen en la Selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial (Leal, 2001). A continuación se presentan las bases teóricas relacionadas con dichos aspectos.

### **2.3.1 Definición**

Antes de entrar en la definición, de lo que es un criterio es importante señalar que mucha de la literatura sobre lo que es o debe ser un criterio está desarrollada en el campo de la administración de empresas. Él por qué de lo anteriormente expuesto, se basa en que dicha área, surgió en un primer momento de la necesidad de visualizar hacia donde se dirige la empresa.

El vocablo criterio, significa emitir un punto de vista o un juicio acerca de una situación particular.

Luego de esta primera definición de criterio, según su etimología hay gran cantidad de conceptos de diferentes autores, que en su gran mayoría no hacen más que decir lo mismo con palabras diferentes. Hoy en día el concepto de estrategias va muy ligado a la corriente del pensamiento logístico dentro de una empresa. Es aquí, la identificación de lo que es un criterio y su estructuración se presta con mucha frecuencia a errores de interpretación de concepto; como por ejemplo entre políticas, restricciones y criterios; o, a que las relaciones entre los criterios no son claras, lo cual origina que los conceptos de prioridades son mal establecidos (Carvajal 1999).

Para tratar de visualizar cómo se comportan los conceptos principales del Pensamiento Estratégico, es tal que dentro del contexto de una empresa surgen unos criterios los cuales sirven de factor detonante para el surgimiento de una visión de empresa, la cual a su vez genera una misión y ésta unos criterios, los mismos conllevan, para finalizar, a la generación de metas. Todo lo anterior va concatenado uno a uno desde el centro de la empresa hacia el exterior de la misma.

Para entender mejor lo anterior Morrisery (1996) define:

**ESTRATEGIA:** señala la dirección hacia donde debe avanzar la empresa, lo que ayuda a determinar sus productos, servicios y mercados futuros. También es definida por Pulgar (1983) como: "la ciencia en el arte de emplear las destrezas y

recursos de una empresa para lograr sus objetivos básicos en las condiciones más ventajosas”.

**VISIÓN:** representa lo que se cree es el futuro de la empresa a los ojos de los clientes, empleados, propietarios y otros accionistas importantes

**MISIÓN:** describe la naturaleza de la empresa o él por qué sé esta en ese negocio, a quien sirve y los principios o valores que pretende funcionar.

Para ilustrar lo anteriormente expuesto se muestra la figura 2-4

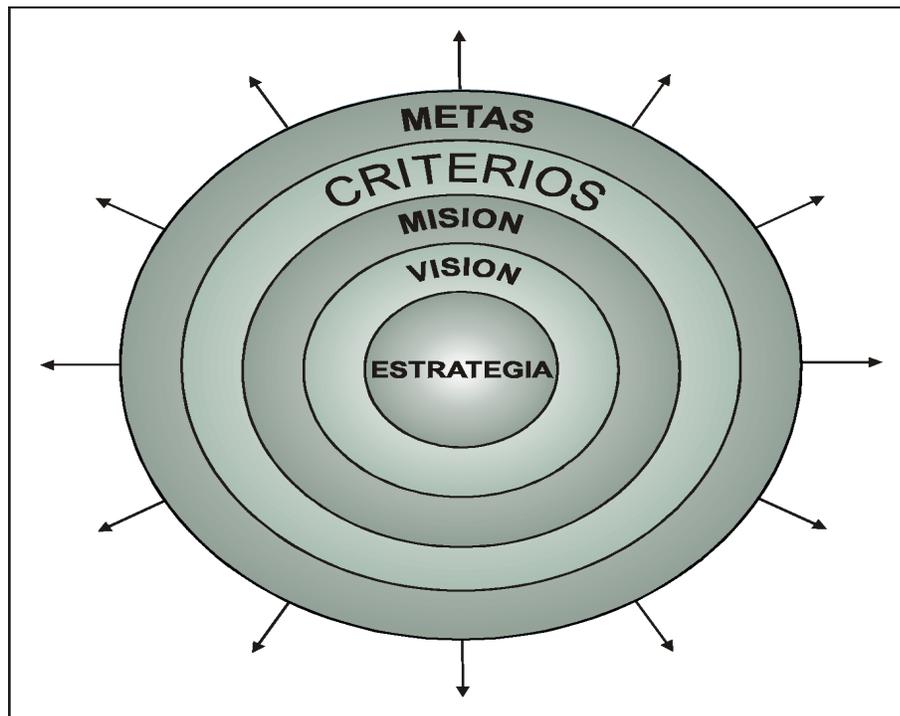


Figura 2.-4: Los Criterios Dentro de las Estrategia de la Empresa. Carvajal (1999).

Dentro de la misma temática, Sallenave (1985) define:

**CRITERIOS:** son voluntades organizacionales independientes de los deseos de los gerentes; ejemplos: supervivencia, crecimiento y utilidades.

**METAS:** son sub-conjuntos de los criterios determinados por los dirigentes de la empresa.

McConkey (1985) define los criterios como:

*“Una descripción específica de un resultado final que se debe alcanzar. El criterio no dice cómo se va alcanzar, pero sí indica el qué – resultado que debe alcanzarse – y el cuándo – la fecha tope en que debe lograrse.”*

En muchos casos la visión de una empresa está contenida dentro de su misión. Esta última está afectada por factores internos y externos a la empresa, lo cual genera fortalezas y debilidades, oportunidades y amenazas. Los criterios están alineados según su misión (ver figura 2-5) y según las estrategias de los diversos departamento de la empresa.

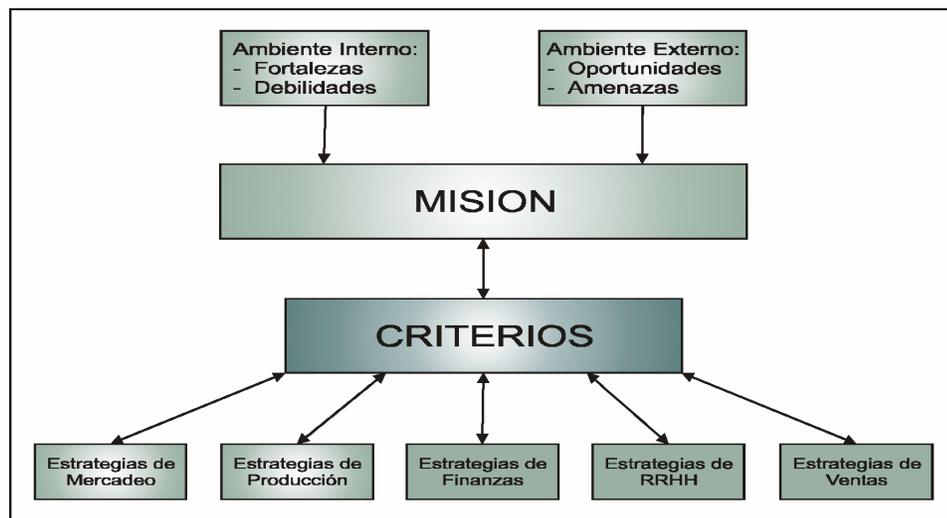


Figura 2-5. Los criterios dentro del pensamiento estratégico. Carvajal (1999).

Para manejar un concepto común de Criterio, en el presente trabajo adoptará la conceptualización presentada por Carrasquero (1995).

*“Los criterios representan las direcciones de mejoramiento de las preferencias de la unidad de decisión (o de cualquier otro actor del proceso) a lo largo de atributos o agregados de atributos.”*(Ob. Cit.).

En donde, los atributos son:

*“Elementos conmensurables que permiten describir una realidad en estudio. Pueden referirse a cualidades objetivas o subjetivas, pero que son percibidas por los actores involucrados en el proceso de decisión como características propias de los criterios que conforman esa realidad”* (Ob. Cit.).

Por Metas se entiende el nivel de un atributo asociado al criterio el cual identifica claramente el nivel de logro a alcanzar. La meta precisa cómo, en qué forma y cuándo se va a lograr la intención (Ob. Cit.).

### **2.3.2 Determinación de Criterios**

La determinación de los criterios va a depender de dos principios fundamentales:

- a.- Las posibles consecuencias de cada alternativa.
- b.- La preferencia del ente decisor o en el caso del presente trabajo del grupo de expertos sobre esas consecuencias.

Según R. Keeney (1994), quien ha sido uno de los autores que más ha escrito sobre el modelaje y determinación de criterios: *“El punto de partida para especificar criterios es la creación de una lista sin estructurar de posibles consecuencias de las alternativas”*; y como se señaló anteriormente, esas alternativas no son más que la generación de ideas buenas o malas que inicialmente, el ente decisor, genera; en otras palabras es un acto creativo.

Keeney afirma:

*“... la cantidad de tiempo usualmente tomado para articular valores apropiados para un problema de decisión es relativamente minúsculo con el tiempo usado para direccionar otros aspectos del problema. La función criterio debe ser determinada en una hora con una pequeña reflexión, y sin embargo varias personas/años de esfuerzo y millones de dólares pueden ser usados para modelar las relaciones entre alternativas y consecuencias y para reunir información sobre esas relaciones”.*

El camino más fácil para identificar criterios, siempre será preguntar al grupo de expertos.

Keeney identifica las siguientes técnicas para reconocer criterios.

Generar una Lista de Deseos: ¿Qué se busca? ¿Qué es lo que se quiere?

Describir las Alternativas: ¿Qué es una alternativa perfecta, una alternativa terrible y una alternativa razonable? ¿Qué es lo bueno o lo malo de cada una?

Identificar el Problema y Defectos: ¿Qué es lo fuerte o débil de tu sistema? ¿Qué necesitas fijar?

Señalar las Consecuencias: ¿Qué está ocurriendo de bueno o de malo? ¿Qué pudiera ocurrir?

Identificar Metas, Restricciones y Lineamientos: ¿Cuáles son tus aspiraciones? ¿Qué limitaciones tienes arriba de ti?

Mostrar Perspectivas Diferentes: ¿Qué crees que le preocupe a tu competidor? En el futuro ¿Qué te preocuparía?

Definir Criterios Estratégicos: ¿Cuáles son tus criterios básicos? ¿Cuáles de tus valores son absolutamente fundamentales?

Definir Criterios Genéricos: ¿Qué criterios tienen tus clientes, empleados, técnicos y tú mismo? ¿Qué criterios de desarrollo social, económicos, de salud y seguridad son importantes?

Estructurar Criterios: seguir el significado de las relaciones ¿Por qué es ese criterio importante? ¿Cómo puedes lograrlo? Usar especificaciones: ¿Qué significa para ti ese criterio?

Cuantificar Criterios: ¿Cómo mides la relación de este criterio? ¿Por qué el criterio A es tres veces más importante que el criterio B?

Según el autor de estas técnicas señaladas existe redundancia expresada a propósito ya que *“es más fácil reorganizar criterios redundantes cuando están listados que identificar criterios ausentes”*. Keeney (1994) también establece *“que para que un criterio pueda dirigirse hacia donde queremos, debemos tener”*:

1. Un contexto de decisión.
2. Un Criterio.
3. Una dirección de preferencia.

Para ejemplificar esto, Keeney describe que el criterio de una compañía de productos forestales: “Minimizar el impacto ambiental”. El contexto de decisión sería los recursos naturales, el criterio es el impacto ambiental y la preferencia es por el menor impacto que se ocasionaría.

Según otros autores, para fijar con precisión y en forma completa los criterios, ayudan las seis preguntas de Rudyard Kipling: ¿Qué, cómo, quién, por qué, dónde, cuándo? (En inglés ¿What, How, Who, Why, When, Where?) y sus múltiples combinaciones posibles.

Esta amplitud de preguntas se debe el que al fijar criterios es un campo muy genérico. Su amplitud puede ir desde fijar criterios para colocar una estación espacial en Marte o fijar criterios para planificar un semestre de clases.

La lista inicial muy probablemente contendrá varios ítems que no serán criterios realmente, se mezclan posiblemente alternativas diversas, restricciones y objetivos para evaluar alternativas. Aquí, es necesario separar los criterios generales, de los específicos y de los otros factores mezclados. Lo recomendable es preguntarse ¿Por qué es importante? Lo que ayudará a diferenciarlos.

Los criterios determinados deben tratar de romperse o desglosarse en sus partes lógicas; de tal forma poder determinar factores que permitan medirlos o generar nuevos subcriterios.

Keeney – Raiffa (1976) establecen, que al dividir criterios en sub-criterios en cualquier nivel, “se debe considerar todas las facetas de los criterios generales para describir el sub-criterio”. Se pueden tener jerarquías en forma lateral como en forma vertical. Estos autores referencian a Ellis (1970) quién diseñó los llamados criterios en la jerarquía; si el menor curso de acción pudiese ser alterado si el criterio fuese excluido. En caso afirmativo, obviamente el criterio debe ser incluido. En el caso negativo, el grupo de especialistas puede aún decidir mantenerlo, pero si el análisis se complica puede ser excluido.

Una vez obtenida la jerarquización de los criterios, si el grupo de especialistas es su propio analista, y no tiene que convencer a nadie más de lo correcto de su

acción, él puede probar su modelo en un esquema mental asignando posibles valores a los criterios planteados y observando que pasaría.

De otra forma, si el grupo de especialistas y su analista trabajan aparte, comienza el problema de cómo involucrarse. En esta situación, el análisis presumiblemente presentará sus resultados y recomendaciones a los especialistas, quien seleccionará una alternativa o un curso de acción. Para justificar su trabajo, con la mayor cantidad de detalles posibles. Él buscará usar índices para aquellos criterios subjetivos. El analista buscará el o los criterios estratégicos y descenderá hasta los criterios específicos.

Si se busca mostrar el trabajo para convencer a otros de lo correcto de la jerarquización, probablemente se comience con los criterios específicos y se ascienda a los criterios estratégicos.

Lo más recomendable, es que en el proceso de establecimiento de criterios, los especialistas y el coordinador trabajen en conjunto desde el principio; para ello se describirán más adelante algunas técnicas aplicables para este caso. Desde este punto de vista, se puede trabajar desde lo estratégico hasta lo específico o viceversa; según la dinámica establecida por los entes participantes. De esta forma se obtiene una decisión ganó – ganosa; ya que ambos fijaran un camino de acción en común acuerdo. En la fijación de criterios deben participar todos los involucrados, de tal forma que todos los decisores sepan que esperar o por lo menos tengan una idea vaga de hacia dónde se dirigen. Los criterios así mismo planteados, deben ser posibles de alcanzar, es decir, que se puedan obtener resultados factibles, para ser llevados a la aplicación en la realidad.

### **2.3.3 Técnicas para la Generación de Criterios.**

Existen diferentes métodos para la fijación de criterios en grupos, cada uno es útil a su tiempo y cada uno tiene ciertas consecuencias para futuras acciones del grupo, lo importante es que el grupo comprenda estas consecuencias para que pueda elegir un método para la fijación de los criterios apropiados para el tiempo

que dispone, la historia del grupo, la clase de tarea en la que trabaja y la clase de clima del grupo.

Sin embargo al trabajar directamente con grupos, se debe tomar en cuenta, las ventajas y desventajas de una decisión tomada en grupo (ver tabla 2-1).

Tabla 2-1: Ventajas y desventajas de una decisión en grupo.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Amplitud de la información	Lentitud
Diversidad de la información	Conformismo
Aceptación de la solución	Dominio de la discusión
Legitimidad del proceso	Responsabilidad ambigua

Fuente: Robbins, (1996).

Indistintamente, en muchas ocasiones, al trabajar en grupo, la fijación de criterios responde a algunos de los siguientes casos:

i. Fijación de Criterios por Falta de Respuesta (abandono): es un método común, pero poco visible, consiste en que alguien del grupo propone una idea y antes de que nadie haya dicho nada sobre ella, otro sugiere otra idea y así sucesivamente hasta que el grupo encuentra una sobre la cual acepta actuar, el grupo en cierto sentido decidió sobre las ideas anteriores al dejarlas pasar por alto, el grupo hizo un acuerdo común de no apoyarlas, fueron abandonadas, el aspecto negativo es cuando el ponente siente que su idea fue abandonada.

ii. Decisiones por Regla de Autoridad: el grupo establece una estructura de mando o poder que muestra que las decisiones serán tomadas por el presidente, el grupo genera y discute libremente ideas o soluciones, pero el presidente decide en cualquier momento después de haber oído que ha decidido hacer tal o cual cosa.

Este método es eficaz, pero su efectividad dependerá de que el presidente sea un oyente bueno para entresacar de la discusión grupal la información correcta que sirva de base para la decisión, aunque puede mirar el compromiso del grupo si la extracción de la información no fue adecuada o no tiene relación con lo discutido por el grupo.

iii. Decisión por Minoría: ocurre cuando uno, dos o tres individuos emplean tácticas de acción o que producen acción, y por lo tanto, son consideradas como decisiones, pero se toman sin el consentimiento de la mayoría, una sola persona del grupo puede imponer su decisión, particularmente si desempeña algún tipo de presencia en el grupo, sin dar oportunidad a la oposición de sostener su parecer. (El presidente da su opinión y luego de manifestarla pretende consultar al grupo, todos estamos con la idea de Juan así que procedamos, o dos personas se ponen de acuerdo manifiestan su idea y preguntan ¿Alguien está en desacuerdo?). Esta técnica se basa en que el silencio implica aceptación y en el hecho en que alguien se opone u objeta se puede considerar como obstrucción, y el grupo tiende a dejar correr la decisión aunque no esté de acuerdo.

iv. Decisión por Mayoría (votación, encuesta, etc.): se pregunta a cada miembro su opinión, se discuten las opiniones durante cierto lapso y si una mayoría opina del mismo modo, se supone que esta opinión es una decisión, o se plantea una alternativa y se pide una votación a favor o en contra. Pero este método no es perfecto, ya que con frecuencia las decisiones tomadas así, no siempre el grupo las ejecuta bien, ¿qué pasa? Los estudios dicen que existen dos aspectos psicológicos La mayoría cree que sus puntos de vista no fueron tratados adecuadamente y se cree malentendido o resentido.

El miembro de la minoría cree que se formaron dos fuerzas y ganó la errónea, solo es cuestión de tiempo que se den cuenta que su idea o la de su grupo eran las verdaderas. En otras palabras, la votación crea coaliciones y la coalición derrotada no colabora en que funcione la decisión ganadora.

v. Decisión por Consenso: es uno de los métodos más eficaces en el establecimiento de criterios, pero este método es uno de los que requiere mayor tiempo. El consenso no entendido como unanimidad, sino como el hecho de que los miembros que no votaron por la alternativa adoptada por la mayoría comprenden, sin embargo, tal decisión con claridad y están dispuestos a apoyarla implica un estado psicológico, en donde se sienten que los puntos de vista propios fueron suficientemente considerados y se le dio suficiente tiempo para analizarla,

discutirla y entenderla por los demás, pero otra idea fue más adecuada para el momento. Se dice que los problemas importantes y trascendentales, hay que tratarlos con esta técnica ya que es costosa en tiempo, porque para aplicarla hay que planificar una situación en la cual la comunicación sea abierta libre y el clima del grupo alentador para que todos los miembros sientan que han tenido, equitativamente, oportunidad para influir en la decisión.

vi. Decisión por Unanimidad: La decisión lógicamente perfecta, pero la más difícil de aceptar, es cuando se toma la decisión porque todos están realmente de acuerdo con ella. La unanimidad no es siempre necesaria, muchas veces es sólo necesario el consenso, ya que llegar a la unanimidad es costoso y muy difícil, utilizada únicamente para decisiones vitales.

A continuación se describen algunas técnicas o herramientas prácticas, que han demostrado aumentar la capacidad creativa de un grupo para la generación de ideas y mejorar la toma de decisiones por parte del ente o los entes decisores. Estas técnicas no son únicas y son de amplio conocimiento las cuales se recopilieron, con la intención final de que sean utilizadas en obtención y fijación de criterios.

### **2.3.3.1 Interacción**

Es la forma más común de toma de decisiones por grupo, en la cual los miembros interactúan uno con otro cara a cara. Es frecuente que en este tipo de grupo se censuren los miembros a sí mismos y presionen a los miembros individuales hacia una opinión común.

### **2.3.3.2 Tormenta o Lluvia de Ideas**

Esta técnica fue desarrollada en 1963 por Alex F. Osbome, basándose en el deseo de mejorar la solución de problemas encontrando soluciones nuevas y poco usuales. Con esta técnica se pretende superar las presiones de conformismo en el grupo de interacción que retardan la aparición de alternativas creativas. Y esto se logra utilizando un proceso generador de ideas que alienta todas las operaciones, sin impedir la crítica de ellas. En una sesión típica de

tormenta de ideas, entre seis y doce personas se sientan en torno a una mesa. El líder del grupo formula problemas con claridad, de modo que todos los participantes lo entiendan. Entonces presentan, con absoluta libertad, todas las alternativas que se les ocurra en determinado lapso de tiempo. No se admiten críticas y todas las alternativas se apuntan para discutir las y analizarlas más adelante. El hecho de que una idea estimula a otras y que el juicio de incluso las sugerencias más inverosímiles no se dé, sino hasta más tarde, alienta a los participantes a “pensar lo insólito”. En este enfoque la decisión la toma el grupo que tiene a su cargo la implantación.

### **2.3.3.3 Comités**

Un comité es un grupo de personas a las que se les asigna, como grupo, algún asunto. También se les conoce como: consejo, comisión, equipo de trabajo o simplemente equipo. Algunos autores han establecido que un comité pasa por cuatro etapas:

1. Formación: los miembros comienzan a conocerse entre sí.
2. Tormenta de ideas: los miembros determinan el objetivo de la reunión, se producen conflictos.
3. Establecimientos de normas: el grupo llega a un acuerdo sobre normas y sobre algunas reglas de comportamiento.
4. Desempeño: el grupo comienza a generar criterios.

Las personas se desempeñan diferentes roles dentro del comité: algunas buscan información, otros la proporcionan, algunos son impulsores otros son seguidores. Puede que el comité sólo recomiende o tome decisiones, ello depende del alcance y del poder del mismo (ob-cit)

### **2.3.3.4 Método Sinéctico**

Fue desarrollada por William J. Gordon en 1956. En esta técnica los miembros del equipo son seleccionados cuidadosamente de acuerdo con su capacidad para hacer frente al problema en cuestión. El líder del grupo solamente conoce la naturaleza específica del problema. Él limita y dirige cuidadosamente la discusión

sin revelar cuál es el problema real. Con ello se evita que el grupo llegue a una solución prematura del problema. El sistema incluye un grupo complejo de interacciones del cual surge una solución. El método tiene por objetivo aprovechar la fuerza creativa, inherente a la formación de analogías, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se trata de poner de manifiesto las diferentes concepciones del problema. Esto se realiza pidiendo a cada miembro del grupo que formulen una definición del problema. Luego se unifica el concepto del grupo.
2. El grupo abandona el problema y se dedica a una discusión totalmente alejada de la cultura de trabajo.
3. Se generan ideas y se efectúa un recuento de dichas ideas, sobre el objetivo del problema definido anteriormente.

#### **2.3.3.5 Método Delphi**

Fue desarrollado por Norman Dalkey y Olaf Helmer. Su nombre deriva de la ciudad griega de Delfos, célebre por los oráculos que hacia Apolo por boca de la Pitia.

Es un método de formalización del proceso de negociación entre dirigentes, con el objeto de lograr un consenso de objetivos y políticas, es normativo, los participantes son invitados a revisar sus posiciones iniciales a la luz de las opiniones de los otros. Se pueden distinguir dos tipos de método a saber:

- a. DELPHI-E: se aplica a la determinación del estado futuro del mercado o del entorno en una industria particularmente inestable.
- b. DELPHI-P: permite identificar la mayor cantidad de criterios posibles, de evaluarlos separadamente y de lograr un consenso sobre él o los criterios que parecen ser los más deseables.

En el presente trabajo se hablará sobre este último y solo se le llamará Delphi. Es un proceso iterativo que termina cuando las opiniones se han reducido suficientemente, esto es, cuando existe acuerdo entre los criterios fundamentales y en los sub-criterios.

Delphi procede en seis etapas:

1. Formulación del Problema: se pregunta ¿Por qué tenemos un problema de criterios o criterios?
2. Enumeración de Opciones: criterios posibles, elección de políticas que respondan a varias configuraciones de criterios.
3. Determinación de Posiciones Iniciales: ¿Cuáles son los puntos en que hay unanimidad y aquellos en que hay desacuerdo?
4. Análisis de Diferendo: ¿Por qué hay desacuerdo? ¿Cuáles son las premisas, los hechos, las opiniones sobre las cuales se apoyan los razonamientos personales para llegar a posiciones opuestas?
5. Análisis de Grupo: ¿Cómo reacciona el grupo de dirigentes ante los argumentos de cada uno para defender su posición?
6. Reducción de Opciones: Cada uno reevalúa su posición inicial (etapa 3) según el resultado del análisis del grupo (etapa 5), y se reduce entonces el número de opciones (etapa 2).

Es un proceso iterativo que termina cuando las opciones se han reducido suficientemente, esto es, cuando existe acuerdo en los criterios fundamentales y en los sub-criterios.

El método Delphi no requiere la presencia física de los miembros del grupo. Posee como inconvenientes que el método es altamente consumidor de tiempo, si los miembros del grupo no se encuentran cara a cara puede que no surjan ideas que podrían emerger al calor de una discusión.

#### **2.3.3.6 Método K – J**

Desarrollado por Kawasaki Jiro, sostiene que la clave para llegar a una solución idónea es dar con la adecuada estructuración del problema. Según los siguientes pasos:

1. Se pide a los participantes que escriban en fichas todos los elementos que le sean propios al problema.

2. Se forman combinaciones aleatorias de los elementos de las fichas; cada combinación se discute a fin de determinar si tiene sentido; si lo tiene se agrupa con elementos parecidos.
3. Se caracteriza los grupos de observaciones por patrones y en forma jerárquica, quienes revelaran la estructura de las ideas, según los criterios planteados.

### **2.3.3.7 Árbol de Decisiones**

El árbol de decisiones, como método cuantitativo, es una presentación gráfica en red, en los cuales se muestran los puntos de decisión, los acontecimientos fortuitos y las probabilidades existentes en los diversos cursos posibles.

Puede ser con probabilidades o sin probabilidades. El árbol de decisión con probabilidades requiere asignar una probabilidad a algún evento en un futuro incierto, se obtiene un valor esperado al multiplicar el valor condicional de un resultado por la probabilidad que ocurra. El árbol de decisión describe cada alternativa como la rama de un árbol. Muestra los valores condicionales, los pesos proporcionados por las probabilidades asignadas y el valor esperado final de cada rama. Entonces pueden compararse los frutos económicos previstos de cada alternativa.

1. Árboles de Decisiones sin Incertidumbre: El árbol de decisión, como método cuantitativo, es una presentación gráfica en red. Los distintos objetivos se ubican de acuerdo a sus atributos e influencias con respecto a los demás criterios; se definen criterios principales que serán seguidos de criterios menores, los cuales permiten la valoración de los primeros, tanto así que de ser necesario, éstos a su vez se pueden descomponer en un proceso sucesivo.
2. Árboles de Decisiones con Incertidumbre: en este método, los criterios son seguidos de consecuencias, cada una de ellas con un grado de probabilidad, que a su vez dan origen a nuevas acciones que tienen también consecuencias.

Determinada la probabilidad, se puede calcular la probabilidad de toda la secuencia. Las ramas con mayor probabilidad aportarán mayor peso específico. También se puede emplear el valor esperado de ocurrencia de cada rama.

### **2.3.3.8 Reuniones Electrónicas**

Es el enfoque más reciente en la toma de decisiones, es una mezcla de la técnica del grupo nominal con la computación. Básicamente se reúne a cada tomador de decisión frente a un computador. Mediante algún protocolo de comunicación (por ejemplo Internet) todos están conectados simultáneamente en el mismo lugar o en cualquier parte del mundo. Se entrega a los participantes los temas a discutir, inmediatamente comienzan a escribir en su computador las opiniones y votos a favor o en contra de los planteamientos. Todos los participantes pueden observar simultáneamente los comentarios de los demás participantes. Se hace anónimo si se desea, lo cual deja de fluir mejor los planteamientos aunque parezcan fuera de orden y no logran sanción alguna. Se estima que las reuniones de este tipo son hasta 55% más rápidas, ya que se eliminan los chismes y las desviaciones de las reuniones. La desventaja más relevante es que están mayormente beneficiados los más rápidos transcritores de datos y si el grupo es anónimo las mejores ideas no reciben reconocimiento público.

### **2.3.3.9 Diagramas Causa-Efecto**

También conocido como diagrama espina de pescado ó Ishikawa, en honor a su creador Kaoru Ishikawa. Se utiliza para ilustrar las relaciones entre un “efecto” y todas las posibles causas que lo influyen. Una adaptación al problema de generar criterios sería la de colocar el problema a resolver a la derecha y los criterios necesarios para resolver dicho problema a la izquierda en forma de “espina de pescado”.

Se identifican, sobre la base de la opinión de los participantes, los criterios principales y los demás criterios subordinados. Ver figura 2.6.

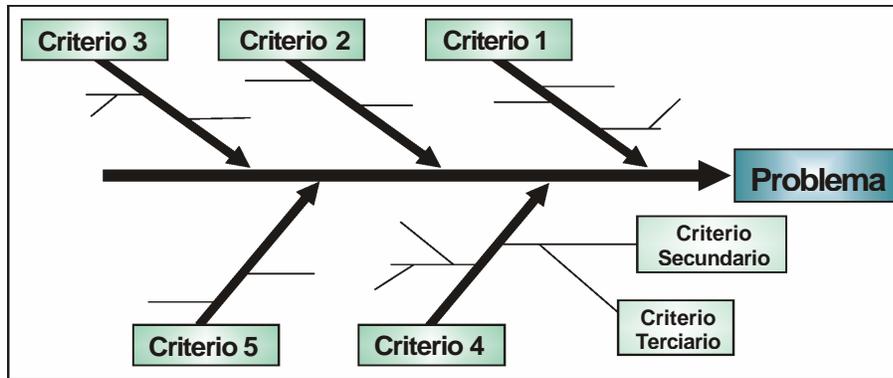


Figura 2.6. Diagrama de Espina de Pescado. Fuente: Robbins, (1996).

Además, se puede seleccionar criterios mediante alguna de las siguientes técnicas en condiciones de incertidumbre:

- a. Criterio Pesimista, MÍNIMAX o de Wald: se selecciona aquel criterio que genere la mínima pérdida entre las máximas pérdidas posibles; en otras palabras una selección de lo mejor entre lo peor. Es un enfoque netamente conservador.
- b. Criterio MÁXIMAX o de Hurwicz: se selecciona el mejor de los mejores criterios. Es un enfoque optimista.
- c. Criterio de Hurwicz Modificado: introduce el coeficiente de optimismo, se considera la mejor y la peor alternativa, considerando su importancia de acuerdo a unos factores (pesos) probabilísticos (de cero cuando es más pesimista a uno cuando es más optimista).
- d. Criterio de Laplace o de Bayes: asume que todos los criterios tienen la misma probabilidad de ocurrencia, por lo cual estima esta probabilidad y calcula el valor esperado de ocurrencia de cada criterio. Se selecciona la alternativa con mayor valor esperado.
- e. Criterio de Savage: establece un criterio MÍNIMAX, o sea, el ente decisor construye una matriz de arrepentimiento (donde se refleja el grado de arrepentimiento por haber seleccionado un objetivo y no otro), escogerá aquel criterio que minimiza el arrepentimiento máximo que pueda obtener. Es un criterio ultraconservador.

### **2.3.4 Jerarquización de los Criterios**

Se entiende por jerarquía a una abstracción de la estructura de un sistema, en donde cada uno de los niveles que la conforma consta de muchos elementos o criterios, y tiene como finalidad estudiar las interacciones funcionales de sus componentes y sus impactos en el sistema entero, (Wilby, 1994). Es también una forma conveniente de descomponer un problema complejo, en la búsqueda de explicaciones causa – efecto, en pasos o niveles que forman una cadena lineal (Saaty, 1994).

La estructura que se establece en las jerarquías se va desarrollando hacia abajo, comenzando por el factor más general y menos controlable (metas, objetivos, criterios y sub-criterios), y terminando en el nivel de alternativas, los cuales suelen ser más concretos y controlables. Un criterio útil para comprobar la validez de una jerarquía es el determinar si los elementos de un nivel superior pueden utilizarse como atributos comunes para comparar entre sí, a los elementos del nivel inmediato inferior (Saaty, 1980).

El planteamiento anterior conduce a suponer la independencia del nivel superior dentro de la jerarquía, con respecto a todos los niveles inferiores de la misma. Entendiéndose que existe una independencia entre dos elementos o factores, cuando no existe interacción entre ellos, es decir, cuando es posible establecer intercambios entre cualquier par de elementos, sin considerar la influencia de los otros (Mondelo, 1996).

[Raia, 1.989] establece que a los criterios se les puede asignar prioridades o cierta ponderación relativa, con el objeto de determinar una jerarquía de importancia o funcionalidad, de acuerdo a algunos de los siguientes mecanismos:

1. Clasificación Según el orden de Importancia.
2. Clasificación Según la Clasificación de los Criterios.
3. Clasificación por Medio de la Asignación de Pesos Relativos.
4. Clasificación por su Prioridad

5. Clasificación Según Asignación previa.
6. Método de Comparaciones Pareadas.
7. Método de Normalización.

### 2.3.5 Proceso Analítico Jerárquico

Para el caso de criterios jerarquizados, se recomienda por su simplicidad, **El Proceso Analítico Jerárquico**, metodología propuesta por Thomas Saaty en 1972, es una teoría de medición aplicada a la toma de decisiones multicriterio que utiliza comparaciones entre parejas de criterios para alcanzar un nivel de preferencia entre un conjunto de alternativas previamente seleccionadas (Saaty, 1982). Para aplicar esta teoría de medición se hace necesario desagregar el problema en sus partes componentes o variables hasta llegar a un orden jerárquico de todas ellas, asignar valores numéricos a los juicios emitidos por la unidad de decisión sobre la importancia relativa de las mismas y finalmente, determinar el orden de prioridades de las variables en estudio.

El objetivo del Proceso Analítico Jerárquico puede considerarse como el de aportar una contribución para la toma de decisiones en el modelo de problemas reales; este aporte viene dado por el hecho de suponer que todo juicio que se formule es relativo en sí mismo, por cuanto será dependiente del conocimiento, la intuición, la experiencia, etc. De la unidad de decisión. Para sustentar matemáticamente esta suposición (Saaty, 1980), establece que  $C_1, C_2, \dots, C_n$  son los criterios de algún nivel dentro de una jerarquía y se desea encontrar los pesos  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , de estos criterios sobre un criterio de un nivel siguiente.

Si se denota por  $a_{ij}$  el número que indica la fortaleza de criterio  $C_i$  con respecto al criterio  $C_j$  y se denota a la matriz de comparación por pares como  $A$ , se tiene:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

La escala de comparación utilizada en el Proceso Analítico Jerárquico se presenta en la tabla 2-2, la cual proporciona los valores de los juicios que deben ser insertados en la matriz de comparaciones entre parejas (Saaty - Vargas, 1991).

**Tabla 2-2:** Interpretación de elementos de una matriz de comparaciones por pares.

VALOR DE $a_{ij}$	INTERPRETACIÓN
1	Los criterios de i y j tienen igual importancia
3	El criterio i es ligeramente más importante que el criterio j
5	La experiencia y la apreciación indican que el criterio i es mucho más importante que el criterio j
7	El criterio i es muy importante, o se puede demostrar que es más importante que el criterio j
9	El criterio i es absolutamente más importante que el criterio j
2, 4, 6, 8	Valores intermedios o compromisos recíprocos para comparación inversa

Fuente Saaty - Vargas (1991).

Se debe considerar que  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ , es decir, la matriz A es recíproca. Si el juicio demostrado al realizar las comparaciones entre parejas es perfecto o consistente, entonces:

$$a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk} ; \text{ para todos los } i, j, k$$

Se dice que la matriz A es consistente.

Un caso obvio de consistencia es de una matriz es aquella en la cual las comparaciones se basan en juicios exactos, es decir, donde los pesos  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , son totalmente conocidos. Por lo tanto:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} ; \text{ con } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2-1)$$

y además

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = \frac{w_i}{w_j} \cdot \frac{w_j}{w_k} = \frac{w_i}{w_k} = a_{ik} \quad (2-2)$$

Por otra parte también ocurre que

$$a_{ji} = \frac{w_j}{w_i} = \frac{1}{w_i/w_j} = \frac{1}{a_{ij}}$$

Cuando las comparaciones no se basan en juicios exactos, es decir, donde los pesos  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , son totalmente desconocidos, estos se determinan obteniéndose primero una nueva matriz llamada matriz norma ( $A_{norma}$ ), por estar normalizada. Para esto cada una de las columnas de A, se divide cada columna i de A entre la suma de las fortalezas de los criterios en la columna i. Siguiendo el ejemplo:

$$A_{norma} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \end{bmatrix}$$

Finalmente calculando el promedio de los elementos del renglón i de  $A_{norma}$ , se obtienen los pesos  $w_i$  de los criterios. Para el ejemplo

$$w_1 = \frac{\frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}}}{n}$$

$$w_2 = \frac{\frac{a_{21}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} + \frac{a_{22}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} + \dots + \frac{a_{2n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}}}{n}$$

⋮

$$w_n = \frac{\frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} + \frac{a_{n2}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^n a_{in}}}{n}$$

Si se considera la expresión matricial,

$$A \cdot x = y$$

Donde los vectores de la columna  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  y  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  representan la anotación abreviada del conjunto de ecuaciones

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = y_i, \text{ con } i = 1, 2, \dots, n$$

si se toma en cuenta la ecuación (2-1), se obtiene

$$a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1, \text{ con } i, j = 1, 2, \dots, n$$

y por consiguiente,

$$\sum a_{ij} w_j \frac{1}{w_j} = n; \text{ con } i = 1, 2, \dots, n$$

lo cual equivale a:

$$A \cdot w = n \cdot w \quad (2-3)$$

Que es la expresión que define el autovector (w) y el autovalor (n). Esta expresión, en forma matricial sería:

$$Aw = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

Si se toma en cuenta en el caso práctico en el cual  $a_{ij}$  no está basada en mediciones exactas, sino en juicios subjetivos, deberá considerarse que  $a_{ij}$  se desvía de la razón "ideal"  $w_i / w_j$ , y por consiguiente, la ecuación (2-3) no es necesariamente válida.

Sin embargo, si  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  son los números que satisfacen la ecuación de los autovalores de A

$$A x = \lambda x$$

y si además,  $a_{ii} = 1$  para todo i, entonces,

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = n$$

por lo que si la ecuación (2-3) se sostiene, todos los autovalores son cero excepto uno, que tiene como valor n.

De lo anterior se concluye que, en el caso consistente,  $n$  es el autovalor más grande de  $A$ .

Otra consideración a tomar en cuenta es que, un pequeño cambio en la data de entrada  $a_{ij}$  de una matriz recíproca  $A$ , genera también un cambio pequeño en los autovalores de  $A$ .

Combinando estos resultados se encuentra que si la diagonal de una matriz está conformada por unos ( $a_{ii} = 1$ ) y si  $A$  es consistente, entonces pequeñas variaciones de  $a_{ij}$  mantienen al autovalor más grande  $\lambda_{\max}$  cercano a  $n$ , y los restantes autovalores cercanos a cero.

De esto último se desprende que si  $A$  es una matriz de comparaciones entre parejas empleada en el Proceso Analítico Jerárquico, se hace necesario conocer el vector de prioridades, para eso deberá encontrarse el vector  $w$  que satisfaga la siguiente expresión:

$$A w = \lambda_{\max} w$$

Como es deseable disponer de una solución normalizada,  $w$  se altera ligeramente estableciendo lo siguiente:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n w_i$$

y reemplazando  $w$  por  $(1 / \alpha) w$ . De esta manera se asegura un único valor y también que:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Donde:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i - \text{ésimo elemento en } Aw}{i - \text{ésimo elemento en } w}$$

Obsérvese, como los pequeños cambios en  $a_{ij}$  implican a su vez pequeños cambios en  $\lambda_{\max}$ , la desviación de éste con respecto a  $n$  es una medida de consistencia, el cual se denomina índice de consistencia (IC) y se expresa como:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Adicionalmente, debe introducirse el concepto de índice aleatorio (IA) de una matriz, el cual, se obtiene al generar aleatoriamente matrices recíprocas de diferentes órdenes. Esto permite elaborar una tabla que proporciona el orden de la matriz y su respectivo IA promedio. La razón entre el índice de consistencia (IC) y el índice aleatorio promedio (IA) para un orden de matriz dado, se conoce como la razón de consistencia (RC). La tabla 2-3, proporciona los índices aleatorios correspondientes a matrices de orden 2 a 15.

**Tabla 2-3:** Índices aleatorios promedio.

Orden Matriz (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Índice Aleatorio (IA)	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

Fuente: Saaty (1980).

En general si la razón de consistencia ( $RC = IC / IA$ ) es menor que 0,1 se considera que los juicios emitidos en la evaluación son satisfactorios. Cuando este nivel se excede, se recomienda una revisión de los juicios emitidos (Saaty – Vargas, 1991).

Es útil mencionar que los juicios que se emiten para construir la matriz de comparaciones, no solo puede violar la relación de consistencia sino que, también pueden no ser transitivos; es decir, si la importancia relativa del criterio  $C_1$  es mayor que la del criterio  $C_2$ , y la importancia de  $C_2$  es mayor que la de  $C_3$ , entonces la relación de importancia de  $C_1$  no tiene que ser necesariamente mayor que la de  $C_3$ , tal y como ocurre con los juicios de las personas (Saaty, 1980).

#### Fortalezas y debilidades del método

Numerosas son las fortalezas encontradas en el Proceso Analítico Jerárquico, respecto a otras metodologías de pesaje de criterios, entre ellas se tiene:

1. Permite identificar, entender y evaluar todas las partes que componen el sistema en estudio.

2. Es un modelo que proporciona a los individuos o grupos la capacidad de formular sus ideas y definir problemas a través de sus propias experiencias, derivando la solución deseada de las mismas (ob-cit).
3. Es lo suficientemente flexible como para permitir su revisión una vez formulado por cuanto la unidad de decisión puede, tanto expandir los elementos dentro de la jerarquía, como cambiar sus juicios respecto a todos o algunos de los elementos en estudio.
4. Permite evaluar la sensibilidad de los resultados, sin importar el tipo de cambio que pueda considerarse de forma anticipada (Saaty, 1982).
5. Es una de las técnicas que sirve de complemento a otras (Análisis Costo – Beneficio, Minimización de Riesgos, Prioridades) para el proceso de toma de decisiones.
6. Se emplea tanto para atributos mensurables como para aquéllos que no pueden ser cuantificados o medidos.
7. Permite tomar en cuenta todos los elementos de una jerarquía, aún cuando su prioridad pueda ser baja, por lo que no tiene sentido hablar de “alternativas irrelevantes” dentro de la Jerarquía (Saaty, 1980).
8. El Proceso Analítico Jerárquico acepta un cierto grado de inconsistencia de los juicios proporcionando una manera de cuantificarla, permitiendo así a la unidad de decisión la reconsideración de sus juicios (Pinawati, 1996).

A pesar de las numerosas fortalezas antes mencionadas, El Proceso Analítico Jerárquico adolece de las siguientes debilidades:

1. El número de interacciones requeridas para la generación de la matriz de comparaciones puede llegar a ser considerablemente alto en función del número de atributos o variables y niveles jerárquicos considerados (Lim – Swenseth, 1993), por lo que mientras más complejo resulte ser el problema en estudio, mayor número de comparaciones deberán efectuarse, con el consecuente cansancio de la unidad de decisión.

2. Se supone la utilidad de la unidad de decisión como una función aditiva, es decir, sus objetivos son mutua y preferencialmente independientes y esto no se comprueba (Sánchez, 1997).
3. Cuando la unidad de decisión debe emitir un juicio sobre una variable altamente especializada, se requiere la presencia del(os) experto(s) durante el desarrollo de la evaluación.
4. Incapacidad del método para mantener el orden de preferencias (fenómeno de inversión de preferencias) luego de la adición o eliminación de una alternativa. Esto se atribuye al grado de similitud que puede existir entre alternativas factibles y se sugieren condiciones para identificar tal grado de similitud. La condición es: si dos (2) alternativas A y B presentan en todos los criterios una diferencia (discrepancia) en un valor no mayor al 10%, se dice que son similares, en tal caso se debe incluir un nuevo criterio de tal manera que se hagan diferenciables. Sin embargo se ha demostrado mediante ejemplos que aún satisfaciendo el criterio, se presentó el fenómeno (Vinod – Ganesh, 1995) Citado por Sánchez, 1997.
5. Cuando las variables a ser evaluadas no son de la misma naturaleza, encontrándose que un factor no puede ser estrictamente evaluado con respecto a otro, deben efectuarse técnicas de agrupación de manera que las comparaciones se efectúen dentro de los grupos así formados (Saaty – Vargas, 1991).

### **2.3.6 Medición de los Criterios a través de Curvas de Valoración**

En la búsqueda de una estructura de orden, que refleje las preferencias del grupo de especialistas sobre el conjunto de soluciones potenciales que permita extraer una solución final, se encuentra el **Método de Curvas de Valoración**, el cual no es más que una modificación del método de construcción de curvas de valoración desarrollado por Néstor Carrasquero en 1996. Este método permite una interacción con el grupo de especialistas los cuales pueden explorar el conjunto de criterios y así extraer de él una valoración de sus preferencias en función de sus elementos.

Según (Carrasquero, 1996), el concepto de Curvas de Valoración se basa en el esquema de (Roy, 1985) que establece las cuatro relaciones binarias que se ilustran en la tabla 2-4 y en el axioma llamado comparación limitada, el cual sostiene que las cuatro soluciones fundamentales e incompatibles de indiferencia, preferencia débil, preferencia estricta y no comparable, surgen para sentar una representación realista de las preferencias del grupo de especialistas sobre la familia de criterios generada; cualquiera sean las opciones en cuestión, el punto de vista adoptado para compararlas o la información disponible.

**Tabla 2-4:** Las situaciones fundamentales de preferencia y relaciones binarias asociadas.

Situación	Definición	Relación binaria y propiedades
<b>Indiferencia</b>	Cuando existe razones claras y positivas que justifican una equivalencia entre dos opciones	<b>I:</b> Relación simétrica y reflexiva
<b>Preferencia estricta</b>	Cuando existen razones claras y positivas que justifican una preferencia significativa a favor de una de las opciones.	<b>P:</b> relación asimétrica (irreflexiva)
<b>Preferencia débil</b>	Cuando existen razones claras y positivas que justifican una preferencia a favor de una de las opciones, pero tales razones son insuficientes para discernir entre una preferencia estricta y una relación de indiferencia.	<b>Q:</b> relación Asimétrica (irreflexiva)
<b>Incomparabilidad</b>	Cuando hay ausencia de razones claras y positivas que justifiquen una de las relaciones anteriores.	<b>R:</b> relación Asimétrica e irreflexiva

Fuente: Roy (1985).

El grupo de especialistas o el coordinador pueden concebir un modelo satisfactorio que para describir las preferencias del primero, haga corresponder a cada par de opciones una única de las situaciones, o bien un reagrupamiento de dos o tres de estas situaciones fundamentales.

Se define entonces como curva de valoración, a un modelo de representación de preferencias basado en tres de las cuatro relaciones binarias esbozadas en la tabla anterior (preferencia estricta, preferencia débil e indiferencia) y en el axioma de comparabilidad limitada, que permite una representación cuantitativa de las preferencias y al mismo tiempo modelar la amplitud de los umbrales de indiferencia y de preferencia (Carrasquero, 1996).

En el modelo propuesto la Incomparabilidad no tiene cabida por razones constructivas, debido a que las comparaciones siempre son hechas contra un valor prototipo, el cual es el valor preferido por el grupo de especialistas del conjunto de valores posibles (Ob-cit.).

El objetivo de este método, es producir algún tipo de orden sobre los distintos valores que puede tomar un criterio dado para así poder tomar la decisión final. Para ello se construye una curva de valoración que debe resultar similar a la de la figura 2-7, en donde la abscisa representa la variación de un criterio en un rango de estudio y la ordenada representa la media de calificaciones otorgadas por el grupo de especialistas a los valores que se muestran

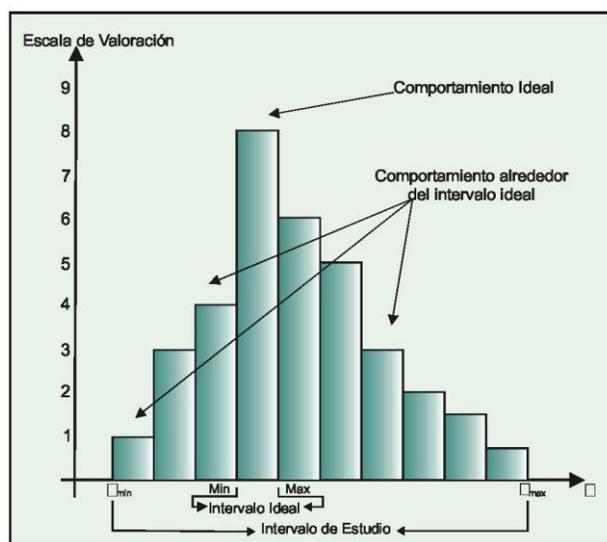


Figura 2-7. Curva de Valoración Tipo.

La curva obtenida presenta varios elementos que se consideran útiles y sencillos de interpretar, aún para grupo de especialistas o unidades de decisión ajenas a teorías de preferencias (Carrasquero, 1996):

Las abscisas corresponden a una barra con una medida de calificación superior a otra, representan soluciones que gozan de mayor preferencia. En particular los máximos valores de medida de calificación están asociados a soluciones que poseen la mayor preferencia. Los valores de las abscisas que tienen como imagen un mismo valor, están asociados a soluciones que tienen un mismo valor de preferencia, pues reciben calificaciones similares; luego hay razones para

suponer que ante todas ellas el grupo de especialistas es indiferente. Entre dos barras claramente distintas, hay un cambio en las calificaciones que otorga el grupo de especialistas, por lo tanto, al pasar de una a otra hay un cambio en sus preferencias, ya que se atraviesa cierto umbral que permite discernir las preferencias de la unidad de decisión sobre las soluciones ubicadas en ambas barras.

Este método se centra en la generación de puntos en aquellas zonas donde se presentan las mayores desviaciones en los juicios emitidos por los especialistas. Las calificaciones que otorgan éstos se efectúan por comparación entre el criterio en estudio y el valor más deseado de dicho criterio en estudio para un determinado Sistema de Levantamiento Artificial, conocido como valor prototipo o ideal.

El método de Curvas de Valoración emplea una escala de calificación adaptada de la metodología del proceso analítico jerárquico (Saaty, 1980), de amplia experimentación en situaciones de decisión reales. La escala numérica para juzgar el grado de similitud entre el rango ideal y la opción a calificar, está compuesta por números enteros del 1 al 9 como se observa en la tabla 2-5.

**Tabla 2-5:** Escala de calificación para la obtención de las curvas de valoración.

Valor	Definición	Significado
9	Excelente	La unidad de decisión no percibe razones para afirmar que el intervalo prototipo y el intervalo a calificar difieren en algo, por lo que su grado de similitud es el más elevado posible.
7	Muy Bueno	La unidad de decisión percibe muchas razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar son semejantes, pero también percibe algunas diferencias, por lo que su grado de similitud es alto.
5	Bueno	La unidad de decisión percibe tantas razones de semejanza como de diferencias entre el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar por lo que su grado de similitud es medio.
3	Regular	La unidad de decisión percibe muchas razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar son distintos pero también perciben alguna semejanza, por lo que su grado de similitud es bajo.
1	Malo	La unidad de decisión no percibe razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar se parecen en algo, por lo que su grado de similitud es el más bajo posible.
2, 4, 6, 8	Grado intermedio entre valores adyacentes	Estos valores se utilizan cuando se requiere un compromiso entre las situaciones descritas para valores adyacentes en la escala.

Fuente: Silva (2000).

Al igual que la escala empleada en el proceso analítico jerárquico, las calificaciones impares tienen un valor semántico preciso, mientras que las calificaciones pares permiten representar vacilaciones o situaciones de compromiso entre valores semánticos adyacentes.

Por consiguiente, una vez establecida la escala, la curva de valoración a obtener dependerá de la capacidad de discriminación del grupo de especialistas sobre los valores del atributo y de la escala de calificación empleada. En otras palabras, en un mismo intervalo no hay soluciones que el grupo de especialistas haya diferenciado explícitamente en el proceso, por ello se establece que el grupo de especialistas es indiferente ante las soluciones ubicadas en un mismo subintervalo con la escala de calificación utilizada.

#### **2.4 Determinación de las Preferencias de un SLA**

De lo anterior se desprende que para determinar qué Sistema de Levantamiento Artificial es el óptimo de acuerdo a los criterios que se presentan en un pozo determinado, se debe construir una ecuación en la cual se realiza la sumatoria del producto de los pesos de los criterios obtenido del Proceso Analítico Jerárquico y el valor de la función escalón obtenido del método de Curvas de Valoración para cada Método de Levantamiento, y de esta forma obtener la preferencia del Sistema de Levantamiento Artificial que se recomendara aplicar a cada pozo.

La ecuación que permite calcular la preferencia del método es como sigue:

$$Pm_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} f_{ij}(x)$$

donde:

i = Método de Levantamiento en estudio

j = Criterio a evaluar

n = Enésimo criterio

Pmi = Preferencia del Método i

wij = Peso del criterio j para el método de levantamiento i

fij(x) = Valor de la función escalón

## 2.5 Sistemas de Levantamiento Artificial

Los estudios realizados en la ingeniería de producción comprenden una serie de procesos que van desde el comportamiento de afluencia, el levantamiento de los fluidos del pozo, hasta los procesos en superficie como: recolección, separación, tratamiento, almacenamiento y transporte del crudo. Al poner en producción un pozo, se crea una diferencia entre la presión del yacimiento y la presión del fondo del pozo. Esta diferencia de presión ( $\Delta P$ ), origina el desplazamiento de los fluidos desde la formación hacia el pozo (cuando la presión es mayor en el yacimiento que en el pozo). A su vez, por la diferencia de presión entre del fondo del pozo y la de la superficie, los fluidos pueden ser extraídos.

El proceso de levantamiento de los fluidos del pozo hacia la superficie, puede llevarse a cabo mediante producción del pozo por flujo natural o por métodos de levantamiento artificial.

Cuando la energía natural de un yacimiento es suficiente para impulsar los fluidos desde un punto del yacimiento hasta el fondo del pozo, y de allí hasta la superficie, se dice que el pozo produce por flujo natural. A medida que la energía del yacimiento declina, la producción del pozo disminuye hasta el punto en que no puede producir por sí solo, debiéndose adoptar una manera de disminuir la presión del fondo del pozo y la vez de transportar los fluidos hasta la superficie, incrementando de esta forma el aporte de fluidos de la formación al pozo. Esto implica, el uso de un sistema que permita proporcionar energía de manera artificial al pozo, a estos sistemas se les conoce como Sistemas de Levantamiento Artificial.

Por tal motivo la ingeniería de producción (citado por Silva. 2000) ha realizado estudios sobre los Sistemas de Levantamiento Artificial, llegando al consenso que los sistemas más adecuados para explotar petróleo en cualquier campo venezolano son los siguientes:

El Bombeo Mecánico Convencional, El Bombeo Hidráulico, Levantamiento con Inyección de Gas (Gas Lift), Las Bombas de Cavidad Progresiva y Las Bombas Electrosumergibles.

### 2.5.1 Sistema de Bombeo Mecánico

El bombeo mecánico es un sistema de levantamiento artificial que consiste del accionamiento de un balancín a través de una sarta de cabillas que transmite el movimiento a una bomba de succión ubicada en el fondo del pozo logrando así la transferencia del crudo hasta la superficie.

Es el sistema de levantamiento artificial más antiguo y de mayor uso en el ámbito mundial, debido a las pocas limitaciones que presenta. En Venezuela, es ampliamente utilizado este Sistema Levantamiento Artificial. Tiene su mayor aplicación en la producción de crudos pesados y extra pesados, aunque también se usa en la producción de crudos medianos y livianos.

El sistema está formado básicamente (ver figura 2-8) de una unidad de superficie y un equipo de subsuelo, que mediante su acción conjunta van a permitir el desplazamiento del fluido desde el pozo hasta la superficie.

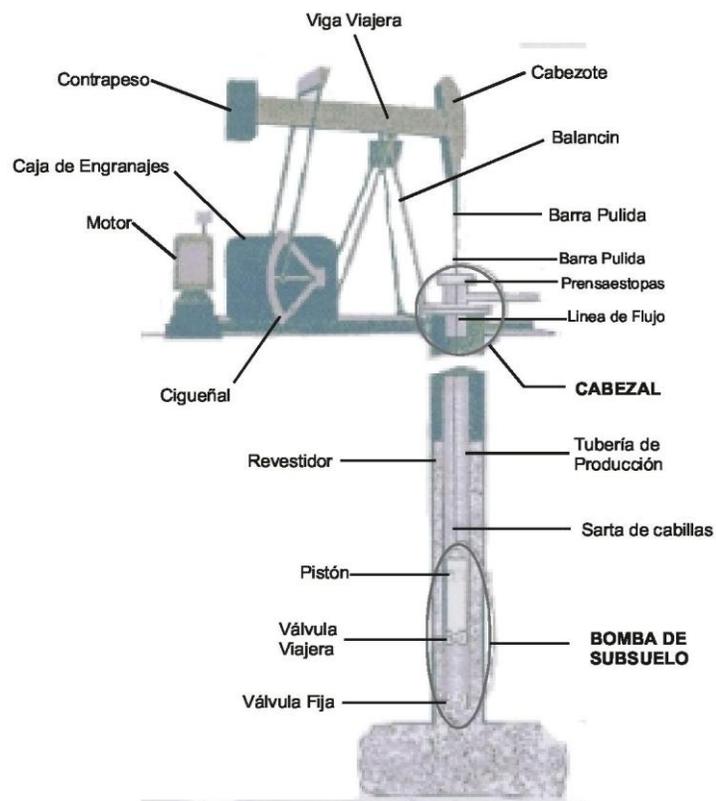


Figura 2-8: Instalación Típica de Bombeo Mecánico. Giusti (1999).

La Unidad de Superficie tiene la misión de transmitir la energía requerida por la bomba de subsuelo desde la superficie hasta la profundidad donde se encuentra ubicada esta última, con el fin de elevar los fluidos hasta la superficie. Está formada por: La Unidad Motriz, compuesta por un motor el cual transmite toda la energía a la caja de engranaje a través de las correas y genera la potencia necesaria para la operación de la unidad de superficie, y El Balancín, cuya función principal es proporcionar el movimiento reciprocante apropiado, con el propósito de accionar la sarta de cabillas y estas a la bomba de subsuelo, que mediante la acción de correas y engranajes logra reducir la velocidad de rotación. El movimiento rotatorio resultante se transforma en un movimiento reciprocante a través de la manivela, la biela y el propio balancín.

El Equipo de Subsuelo, está compuesto principalmente de la bomba de subsuelo y las cabillas de succión.

**La Bomba de Subsuelo:** es el primer elemento a ser considerado al diseñar una instalación de bombeo mecánico, ya que de ella depende el resto de los componentes del sistema. Está compuesta por: el cilindro o barril, que es la parte donde se moverá el pistón en sus carreras ascendente y descendente y además permite confinar los fluidos a ser producidos dentro de la bomba, el embolo o pistón, su función es desplazar el fluido dentro y fuera de la bomba, La válvula viajera, está ubicada en el pistón y permite el desalojo del fluido que está dentro de la bomba y la válvula fija, permite la entrada de los fluidos desde el pozo al interior de la bomba.

**Las Cabillas de Succión:** sirven de conexión entre la bomba de subsuelo y la unidad de superficie, tienen la función principal de: transferir energía, soportar las cargas y accionar la bomba.

**Las Anclas del Eductor:** se encargan de regular el movimiento de la tubería eductora y se instalan en esta, en el punto donde se controla el movimiento del pozo. El ancla se asienta en el revestidor para aprisionar el eductor.

**Otros dispositivos** usados en la completación de un pozo con bombeo mecánico son: La Guía de Cabillas de succión, El Vástago de tiro, El Separador de Gas, Los Dispositivo Conectable – Desconectable, y Los Raspadores de Parafina.

Los volúmenes de fluidos que desplaza la bomba entran en la tubería de producción, desplazando un volumen igual de fluido hacia la línea de flujo y de ésta hacia la estación recolectora.

### Ventajas

1. Las principales ventajas de este método son las siguientes:
2. Las unidades pueden ser instaladas fácilmente en otros pozos a un costo mínimo.
3. El sistema es eficiente, simple y fácil de operar para el personal de campo.
4. Se puede aplicar a completaciones sencillas y completaciones múltiples.
5. Puede bombear un pozo hasta una presión muy baja (dependiendo de las profundidades y la tasa).
6. Es flexible puede equiparar la tasa de desplazamiento con la capacidad del pozo cuando comienza a declinar.
7. Existen métodos para analizar la efectividad del sistema.
8. Puede realizar levantamientos de crudos a altas temperaturas, así como de fluidos viscosos.
9. Puede utilizar gas ó electricidad como fuente de energía.
10. Los tratamientos de corrosión y escamas son fáciles de realizar.
11. El sistema permite el uso de equipos detectores de fallas.
12. Disponible en diámetros diferentes.
13. Cabillas de bombeo huecas son utilizables para completaciones sencillas, ya que facilitan el tratamiento con inhibidores.
14. El sistema puede poseer válvulas dobles lo cual permite bombear tanto en la carrera ascendente como en la carrera descendente.

## Limitaciones

1. En las siguientes condiciones no es eficiente el bombeo mecánico como método de levantamiento.
2. En pozos desviados, porque presenta problemas de fricción.
3. Cuando la producción de sólidos es muy alta.
4. Se limita a pozos poco profundos, profundidad menor a 12.000 pies.
5. En pozos costa afuera, por el peso y el espacio que ocupa el equipo de superficie.
6. En pozos con alta relación gas liquido, ya que afecta la eficiencia de la bomba, reduciendo la producción.

### **2.5.2 Sistema de Bombeo Electrosumergible**

La Bomba Electrosumergible es un mecanismo que opera para levantar el crudo desde el fondo del pozo hasta la superficie, valiéndose de impulsores de subsuelo que giran a gran velocidad.

Esta constituido básicamente por bombas eléctricas de tipo centrífugas de múltiples etapas, caracterizado por el manejo de altas tasas de fluidos, alta eficiencia y rentabilidad.

El rango de estos equipos va desde 200 barriles de fluidos por día, superando en ocasiones los 100.000 barriles de fluidos diarios, con profundidades de bombeo que superan los 15.000 pies.

Este método de levantamiento artificial es aplicable cuando se desea producir grandes volúmenes de fluidos, en pozos medianamente profundos y con grandes potenciales. Sin embargo, los consumos de potencia por barril diario son también elevados, especialmente en crudos pesados. Una instalación de este tipo, puede operar dentro de una amplia gama de condiciones y puede manejar cualquier fluido o crudo con los accesorios apropiados para cada caso. El principio básico del sistema de bombeo es transmitir en forma de presión la energía de un motor eléctrico sumergido en el fluido del pozo.

La figura 2-9 muestra la instalación típica del sistema de bombeo electrosumergible, esta constituido por equipos de superficie y equipos de subsuelo.

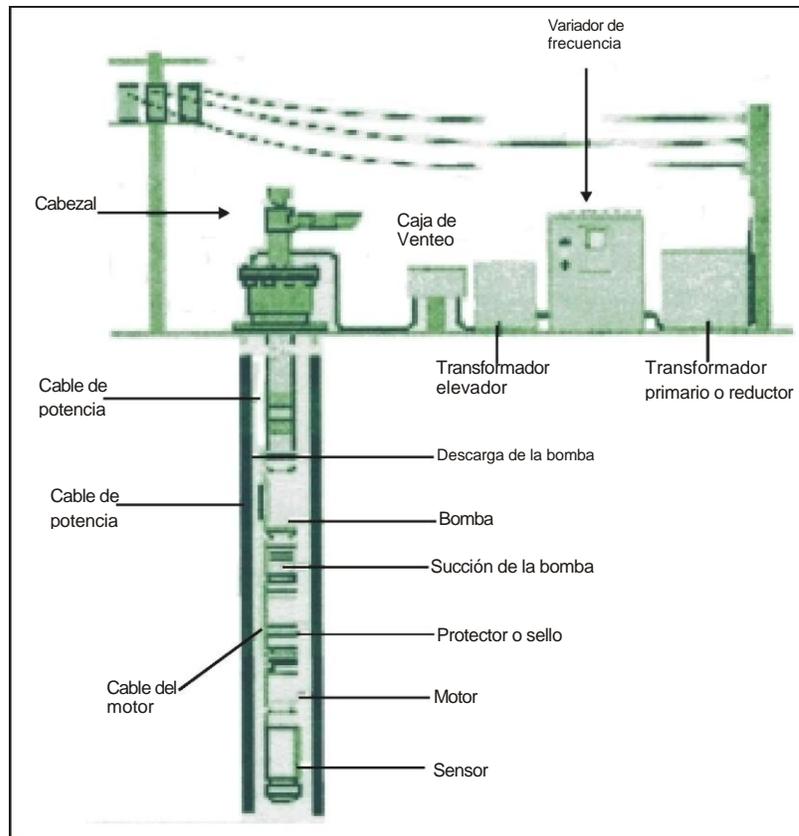


Figura 2-9: Instalación típica de bombeo electro-sumergible. Giusti (1999).

Es posible la aplicación del bombeo electrosumergible en pozos que se encuentren bajo las siguientes condiciones: altas tasa de producción, alto índice de productividad, baja presión de fondo, alta relación agua – petróleo (factor que es considerado de abandono para otros métodos), y baja relación gas – líquido. En caso de alta RGL, se puede emplear este método utilizando un separador de gas.

El equipo de superficie consta de un grupo de transformadores de fase simple o trifásicos cuya función es la de convertir el voltaje primario al voltaje que el motor requiere, el panel de control, su función elemental es controlar la sobrecarga, baja carga o cualquier desperfecto en la instalación, así como registrar el consumo de energía o amperaje del motor en cualquier momento e iniciar el bombeo

automático de la unidad o detener el bombeo por sobrecarga o baja carga del sistema, permitiendo extender el tiempo de vida útil de los equipos. La caja de empalme es utilizada para conectar el cable en la superficie y está ubicada entre el cabezal del pozo y el panel de control por motivos de seguridad, la cual evita el contacto entre el gas que podrá fugarse a través del cable eléctrico y llegar al panel de control, ocasionando una posible explosión o incendio. El cabezal del pozo sirve como elemento sellante alrededor de la tubería y del cable conductor para evitar fugas de gas o la insurgencia imprevista del pozo.

Este elemento sirve para sostener toda la instalación del fondo. Otros elementos principales de la unidad de superficie son: la válvula de retención, la válvula de drenaje, los centralizadores, los flejes para cables, el instrumento sensor de presión y la unidad variadora de velocidad.

El equipo de subsuelo está integrado por: El Motor Eléctrico, que es la fuente de potencia que genera el movimiento a la bomba para mantener la producción de fluidos, El Protector o Sección Sellante, es un dispositivo localizado entre la bomba y el motor y permite aislar internamente el motor de los fluidos que circulan por el pozo, contiene un fluido que sirve como lubricante del eje del motor que va ensamblado a la bomba. Su diseño permitirá que se igualen la presión producida y la presión interna del motor.

El Separador de Gas, tiene como función separar el gas libre del crudo retornándolo en el espacio anular a través de puertos de venteo y solamente dejar pasar a la bomba el líquido en la mayor proporción posible, lo cual mejora la eficiencia de bombeo en pozos con alta retención de gas petróleo. La Bomba Centrífuga, es del tipo multietapa, donde cada etapa consta de un impulsor rotatorio y de un difusor estacionario. El número de etapas determina el volumen de fluido que va a ser producido. Cable Eléctrico, son cables trifásicos que se encargan de suministrar al motor eléctrico la potencia, deben cumplir con los requerimientos de energía del motor y la temperatura del fondo del pozo, además, el diámetro del cable determina la pérdida de voltaje por unidad de longitud y el espacio entre el revestidor y el cuello de la tubería.

## Ventajas

1. El sistema de Levantamiento Artificial con Bombeo Electrosomergible, presenta al igual que otros sistemas de levantamiento artificial ciertas ventajas las cuales deben ser consideradas al momento de realizar el diseño de una instalación.
2. Es apropiado para el bombeo de altos volúmenes de fluidos.
3. Estas instalaciones no presentan peligro en localizaciones urbanas.
4. Fácil de operar.
5. Es fácil la instalación del sensor de presiones hacia la superficie por medio de cables.
6. Las perforaciones oblicuas no presentan problemas.
7. Se aplica a instalaciones costa afuera.
8. Se puede aplicar tratamiento contra la corrosión y la formación de escamas.
9. Costos de levantamiento son bajos para volúmenes apreciables de fluidos.
10. Producción de pozos cuyos empujes sea un acuífero activo.
11. Producción de pozos sometidos a recuperación secundaria mediante inyección de agua.
12. La producción de sólidos.
13. Extensión de la vida productiva de un pozo al mantenerse activos con cortes de agua de 98%.

## Limitaciones

1. No se puede aplicar a completaciones múltiples.
2. Solo es aplicable cuando se usa energía eléctrica estable.
3. Se requieren altos voltajes (1000 v).
4. El cable causa problemas en el manejo de las tuberías.
5. Los cables se deterioran debido a las altas temperaturas.
6. La producción de gas y sólidos constituyen un problema.
7. Carece de flexibilidad en la tasa de producción.
8. Tiene como limitación el diámetro del revestidor.

9. No puede ser instalado por debajo de la entrada del fluido sin un anillo de refuerzo necesario para evitar el fluido por el motor.
10. Usualmente se requiere de un tiempo mayor que en los otros métodos para corregir fallas. Esto se debe a que la unidad total se encuentra en el subsuelo.
11. No es funcional a altas profundidades debido al costo del cable, a posibles problemas operacionales, y a los requerimientos de las altas potencias en superficie.
12. La presencia de gas libre en la bomba, disminuye su capacidad de levantamiento, por lo cual se hace necesaria la instalación de anclas de gas para poder aplicar este método.

### **2.5.3 Bomba de Cavidad Progresiva**

Es una bomba de tipo tubular que consiste en un rotor helicoidal sencillo, rotando excéntricamente dentro de un estator helicoidal elastomérico, el cual constituye una doble hélice con una longitud del doble del recorrido del rotor en un giro. La geometría del ensamblaje determina una serie de cavidades separadas, pero idénticas. Cuando el rotor realiza el giro dentro del estator, estas cavidades se desplazan axialmente de una punta del estator a otra, desde la succión a la descarga, creando la acción de bombeo. Esta bomba es de desplazamiento positivo, debido a que las cavidades se encuentran selladas una a la otra. Empleando materiales elastoméricos, se puede manejar una gama de fluidos de manera eficiente.

Este, como los otros sistemas de levantamiento artificial descritos anteriormente, consta de un equipo de superficie y un equipo de subsuelo. El equipo de superficie, su instalación se realiza directamente en el cabezal del pozo y sus componentes son:

El Cabezal Giratorio; tiene como función principal, aguantar el peso de la sarta de cabillas y rotar las mismas, ésta ajustado a la caja de velocidad variable con su respectiva caja de engranajes y con un freno de retroceso el cual es parte esencial del mismo, cuya función es la de controlar la velocidad de giro inverso,

como consecuencia de un corte de corriente y liberar la torsión acumulada en las cabillas en caso de bloqueo de la bomba.

El Motor; se encarga de accionar el cabezal giratorio a través de un conjunto de poleas y cadenas. Este puede ser eléctrico, de combustión o hidráulico.

La Barra Pulida y su Grapa; la barra pulida es un tubo sólido de acero inoxidable, la cual se conecta a la sarta de cabillas y es soportada en la parte superior del cabezal giratorio mediante la instalación de una grapa.

El Prensaestopas; tiene como función principal sellar el espacio entre la barra pulida y la tubería de producción, evitando con ello, la filtración y comunicación del área donde está ubicado el pozo, su diámetro interno varía dependiendo del diámetro de la barra pulida.

En la figura 2-10 se muestra una instalación típica de la bomba de cavidad progresiva.

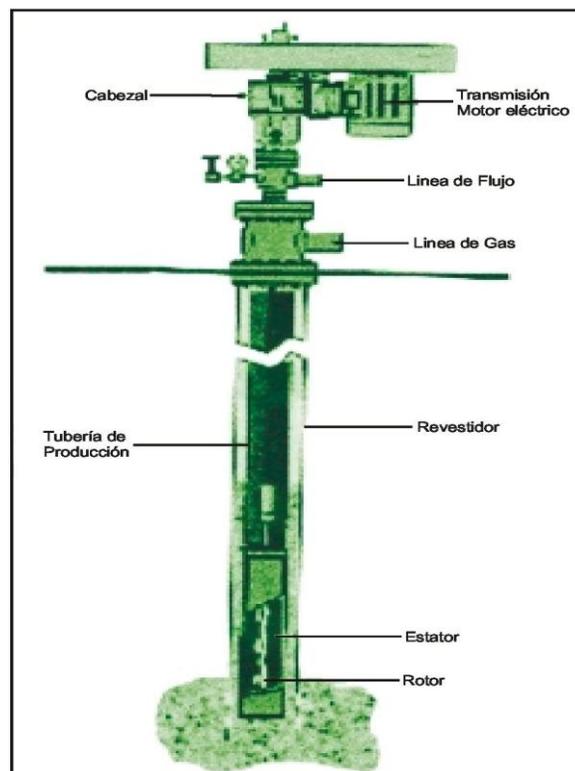


Figura 2-10: Instalación Típica de la Bomba de Cavidad Progresiva Giusti (1999).

El equipo de subsuelo está adaptado a la completación del pozo y está compuesto por la Tubería de Producción; es una tubería de acero que comunica la bomba de subsuelo con el cabezal del pozo y la línea de flujo. La misma debe ser diseñada de tal manera que la conexión de la primera junta de la tubería, arriba del estator, tenga suficiente diámetro disponible para que el movimiento excéntrico que realiza la bomba ocurra sin obstrucción alguna.

La Sarta de Cabillas; es un conjunto de cabillas unidas entre sí, que se introducen en el pozo y forman parte integral del sistema de bombeo de cavidad progresiva.

La Bomba de Subsuelo; es el principal componente del sistema de cavidad progresiva, esta bomba tiene un desplazamiento positivo engranada en forma de espiral, cuyos componentes principales son un rotor y un estator. El crudo es desplazado en forma continua, hasta la superficie por medio del rotor que gira dentro del estator, formando cavidades progresivas ascendentes, utilizando el principio de tornillo sin fin. La capacidad de fluidos que puede manejar estas bombas está en función del modelo y el número de etapas en el ciclo de bombeo de las mismas.

Otros componentes importantes en el equipo de subsuelo son:

Centralizador (Opcional).

Buje.

Ancla o Separador de Gas.

Ancla de Tubería.

### Ventajas

1. El Sistema de Levantamiento Artificial con Bombas de Cavidad Progresiva, presentan ciertas ventajas las cuales deben ser tomadas en cuenta al momento de realizar el diseño de este tipo de instalación.
2. Menor costo de adquisición, instalación y mantenimiento, que otros métodos alternos de levantamiento artificial.
3. Bajo el consumo de energía eléctrica.

4. Reduce el problema de flotabilidad de cabillas en crudos muy pesados, aumentando su vida útil.
5. Preserva el ambiente en áreas pobladas, ya que hay menor contorno sobre la superficie y más bajo nivel de ruido.
6. Opera con bajo torque.
7. Maneja cortes de agua, relativamente altos.
8. La instalación es simple, se realiza directamente sobre el cabezal del pozo y no requiere bases de concreto.
9. Su muy limitado espacio sobre la superficie lo hace disponible para múltiples localizaciones y plataformas costa afuera.

#### Limitaciones

1. Algunas de las limitaciones para el sistema de Bombeo de Cavidad Progresiva son:
2. No se emplea en crudos livianos.
3. Los altos contenidos de aromáticos, ya que afecta al elastómero.
4. No opera eficientemente a grandes profundidades.
5. El elastómero del estator es el limitante en la temperatura de funcionamiento.
6. Maneja sola cantidades limitadas de gas (Por la goma, que se calienta con la fricción), el crudo actúa como lubricante y enfriador

#### **2.5.4 Bombeo Hidráulico**

Este sistema es el más costoso para levantamiento artificial desde el punto de vista de gastos operacionales. Se puede aplicar en dos modalidades: El Bombeo Hidráulico tipo Pistón y El Bombeo hidráulico Tipo Jet.

El Bombeo Hidráulico Tipo Pistón se basa en el uso de bombas reciprocantes cuyo principio de acción, es semejante al de las bombas de bombeo mecánico.

Las Bombas Hidráulicas emplean un pistón accionado por el fluido inyectado a alta presión, una cabilla y dos o más válvulas de retención.

El fluido de potencia a alta presión acciona la sección motriz en el fondo del pozo en forma recíproca al exponer alternadamente diferentes áreas de un pistón impulsor al fluido presurizado. El movimiento recíproca del pistón impulsor se transfiere a través de un acoplamiento mecánico a una bomba pistón.

El Bombeo Hidráulico Tipo Jet es similar al bombeo Hidráulico tipo Pistón, en cuanto a su principio de funcionamiento, basado en la inyección de fluido presurizado (fluido de potencia o fluido motor). En cuanto a las instalaciones y equipo de superficie para ambos métodos de levantamiento son iguales, la diferencia principal es la bomba de subsuelo.

### Ventajas

1. Entre las ventajas del Bombeo Hidráulico se pueden mencionar:
2. La velocidad y el tamaño de la bomba pueden ser cambiadas fácilmente manteniendo las condiciones del pozo.
3. Los crudos pesados y altamente viscosos son manejables al mezclarse con crudos más livianos como fluidos de potencia.
4. Es posible subir la bomba hasta la superficie, sin remover la tubería de producción.
5. Una estación central en la superficie es capaz de manejar varios pozos. Las instalaciones en múltiples pozos pueden accionarse desde una sola fuente de fluido motriz.
6. La instalación ofrece una unidad compacta para pozos aislados.
7. El Bombeo Hidráulico es más flexible para adaptarse a los cambios en caudales de producción.
8. Las Bombas Hidráulicas son utilizadas exitosamente en pozos direccionales.

9. La bomba Hidráulica con pistón tiene mayor eficiencia a grandes profundidades que una bomba que emplee cabilla, ya que no produce el estiramiento de las mismas.

### Limitaciones

1. Las principales limitaciones del Bombeo hidráulico son las siguientes:
2. El mantenimiento de los equipos de altas presiones en superficie es muy costoso
3. Alta inversión inicial. Se necesitan equipos de alta presión, líneas para los fluidos de potencia, bombas triplex, filtros para el tratamiento del fluido de potencia y cabezales en los pozos.
4. Se requiere de tubería de diámetro lo suficientemente grande y resistente a altas presiones.
5. Las altas presiones en superficie representan un riesgo para la seguridad de zonas pobladas cercanas.
6. Alta relación de gas libre a la entrada de bombas afecta su eficiencia.
7. Altas temperaturas pueden causar fallas en las empaaduras.
8. Se requiere todo un equipo de tratamiento para acondicionar el fluido motriz.
9. En Venezuela no se cuenta con personal capacitado, para operar y realizar mantenimiento de estos equipos.
10. Adicionalmente, no existe ninguna compañía suplidora que garantice un servicio técnico eficiente.
11. Existe el riesgo de producirse incendios por posibles escapes de gas en la bomba, lo cual pudiese afectar toda la instalación incluyendo los tanques de fluido de potencia y de almacenamiento.

### 2.5.5 Levantamiento Artificial por Gas

El Levantamiento Artificial por Gas (LAG), opera mediante la inyección continua de gas a alta presión en la columna de fluidos de producción (flujo continuo), con el objeto de disminuir la densidad del fluido fluyente y reducir el peso de la columna hidrostática sobre la formación, obteniendo así una diferencia de presión entre el yacimiento y el pozo, la cual permite que el pozo fluya adecuadamente; o por la inyección de gas a intervalos regulares, para desplazar los fluidos hacia la superficie en forma de taponos de fluidos (flujo intermitente). Como variantes de estos métodos, se han desarrollado otros como la cámara de acumulación, el pistón metálico y el flujo pistón.

En la figura 2-11, se muestra el esquema de un sistema de LAG.

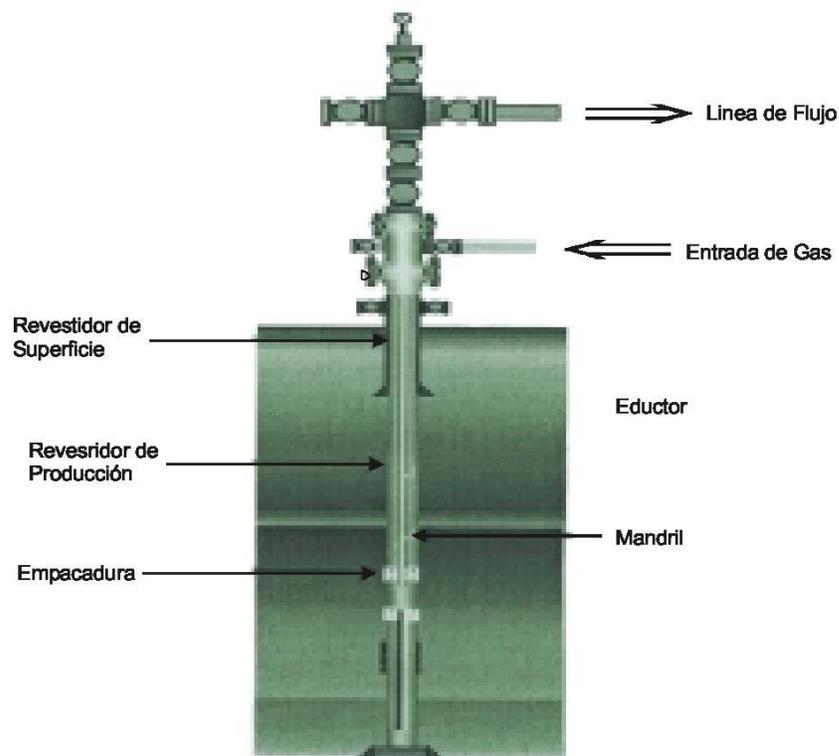


Figura 2.11: Completación Típica de LAG. Chacón (2000).

Una instalación de Levantamiento Artificial por Gas consta al igual que todos los sistemas de levantamiento artificial de los siguientes equipos: la sarta de producción y el equipo asociado, la línea de flujo, el separador, los equipos de

medición y control, pero se hace necesario además de una planta compresora o fuente de gas de levantamiento de alta presión y las líneas de distribución de gas. El equipo de producción consiste en una o más piezas tubulares denominadas mandriles. En los cuales se insertan o enroscan a una válvula de levantamiento, a través de la cuál pasa el gas destinado a levantar el fluido de producción.

El Levantamiento Artificial por Gas a través de flujo continuo, se fundamenta en la inyección continua de gas de levantamiento hacia la columna de fluido para lograr disminuir su densidad, produciendo un incremento de la presión diferencial entre el yacimiento y el pozo. Esto causa el aumento de la relación gas líquido por encima del punto de inyección. Este método aplica en pozos con presiones de fondo y tasas apreciables, dentro de un amplio rango de índice de productividad. Es capaz de manejar arenas, utilizándose por igual en pozos someros o profundos.

Existen dos tipos de Levantamiento Artificial por Gas a través de flujo continuo, el LAG en tubería continua, en el cual, el gas se inyecta por el espacio anular y la producción se realiza por la sarta de tuberías. El LAG continuo por el anular, el gas se inyecta por la sarta de tubería y la producción se lleva a cabo por el espacio anular, este tipo de producción requiere cierta experiencia en su aplicación.

### Ventajas

1. Entre las principales ventajas del flujo continuo se encuentran:
2. Con una sola planta de compresión, se puede aplicar este método a muchos pozos.
3. Maneja la producción de agua y sedimentos.
4. Puede manejar grandes volúmenes de sólidos con problemas mínimos
5. Da flexibilidad de conversión de levantamiento continuo e intermitente.
6. Maneja grandes volúmenes en pozos con altos índices de productividad y alta presión estática (levantamiento continuo) 50.000 B/D (7.949,37 m<sup>3</sup>/d).

7. La fuente de energía puede estar localizada remotamente.
8. Es fácil obtener las presiones y los gradientes en el hueco del pozo.
9. El levantamiento de los pozos de gas no constituyen un problema.
10. Se pueden recuperar las válvulas con equipo de guaya (en la mayoría de los casos).
11. Las completaciones desviados no representan un problema.
12. Aplicable a instalaciones costa afuera.

### Limitaciones

1. En muchos campos no se dispone del gas necesario para el levantamiento.
2. Dificultad para levantar emulsiones y crudos viscosos.
3. No es eficiente en campos pequeños cuando se necesita un equipo de compresión.
4. Tiene problemas de formación de hidratos y congelación de gases.
5. Presenta problemas con líneas superficiales sucias.
6. Se dificulta realizar el análisis adecuado sin supervisión en ingeniería.
7. No puede producir eficientemente en pozos profundos hasta presiones de abandono.
8. En sistemas reciprocantes necesita gas de formación para los motores de combustión interna. No puede funcionar con gas o electricidad.
9. El revestidor debe resistir la presión de levantamiento.
10. Presenta problemas de seguridad con el gas a altas presiones.
11. No se puede obtener presión mínima de fondo al producir el pozo, ya que la misma se incrementa, tanto por la profundidad como por el volumen inyectado.
12. Se debe disponer de una fuente de gas y una planta compresora.

13. Esta limitado a levantar crudos medianos y livianos.
14. El pozo debe contar con alto índice de productividad.
15. Para bajas presiones de yacimiento, se requieren grandes volúmenes de gas de levantamiento.

El levantamiento artificial mediante flujo continuo de gas, es normalmente más eficiente que el de flujo intermitente, por lo tanto, debe usarse cuando sea posible. La finalidad de la inyección en forma intermitente es impulsar hacia la superficie, un tapón de líquido que inicialmente se encuentra por encima del punto de inyección. Por esto el proceso requiere altas tasas de inyección de gas, para que el fluido acumulado viaje a una velocidad mayor que en la inyección continúa y de esta manera, incrementar la eficiencia de recuperación y disminuir las pérdidas por resbalamiento del líquido. La entrada de gas a la tubería, se lleva a cabo a través de una válvula con un orificio grande que permite pasar un volumen considerable de gas.

#### Ventajas

1. Las principales ventajas del flujo intermitente son:
2. Puede obtenerse menor presión de fondo que en el flujo continuo y con menor relación de gas de inyección.
3. Pueden recuperarse las válvulas con técnicas de guaya fina o con tubería.

#### Limitaciones

1. Las principales limitaciones del método son:
2. Debe disponerse de una fuente de gas a alta presión.
3. Esta limitado a bajas profundidades.
4. Se presentan perdidas de líquidos por resbalamiento. La fracción del tapón que cae se define como la diferencia entre el tapón original y la fracción del tapón que produce una disminución en la producción.

5. Si la presión del yacimiento es muy baja, el tiempo de formación del tapón de líquido es muy largo, si el índice de productividad es muy bajo.
6. Esta limitado a crudos medianos y livianos.

## **2.6 Modelos de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial**

Los modelos desarrollados para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial son procedimientos y metodologías que proporcionan al usuario una forma de recomendar el Sistema de Levantamiento Artificial más adecuado que requiere un pozo y que garantice la producción óptima del crudo.

Entre los Modelos de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial que se han desarrollado están los siguientes:

- **Modelo 1:** Modelo de Selección Óptima del Lago de Maracaibo (**MSOLM**).
- **Modelo 2:** Procedimiento para la Escogencia del Método Óptimo de Producción Adaptable a Cerro Negro.
- **Modelo 3:** Matriz de Evaluación Tecnológica (**MET**).
- **Modelo 4:** Sistema Experto de Levantamiento Artificial (**SEDLA**).
- **Modelo 5:** Metodología de Selección Óptima de Levantamiento Artificial (**MSOLA**).

Para efecto del presente trabajo, los modelos que se describirán son los modelos tres, cuatro y cinco ya que son los más generales pues se pueden aplicar a cualquier área geográfica.

### **2.6.1 Matriz de Evaluación Tecnológica**

Es un modelo basado en el proyecto original de Gestión tecnológica, realizado por Pugh Roberts Associates y a las actividades promovidas por un grupo interfiliar de PDVSA asesorados por la empresa SRI International, para la generación de una cartera de proyectos tecnológicos. Producto de estos esfuerzos se crea el Sistema de Inteligencia Tecnológica (S.I.T.)

Las funciones básicas del Sistema de Inteligencia Tecnológica son crear los mecanismos para apoyar oportunamente los procesos de toma de decisiones en especial los referentes al uso de tecnologías, establecer canales que permitan la comunicación e intercambio entre el personal y expertos técnicos, mejorar la disseminación de la información y por ultimo fortalecer la competencia tecnológica a nivel global de PDVSA, proporcionando información que estimula la creatividad y mejor uso de la tecnología.

En el ejercicio de evaluación de tecnologías empleado por PDVSA se utilizan los siguientes criterios:

- Importancia estratégica de la tecnología
- Valor comercial.
- Urgencia para el negocio.
- Disponibilidad de la tecnología.
- Posición actual de PDVSA

En este proceso una vez identificados los escenarios, con sus distintas necesidades y oportunidades se procede a jerarquizar las mismas según las estrategias de la corporación arrojando como resultado la Jerarquización cualitativa de cada opción.

La Metodología de Evaluación de Opciones tecnológicas implementada por PDVSA, se desarrolló a partir de criterios que miden los atributos cualitativos y cuantitativos, lo cual posibilita la evaluación y jerarquización, en forma sistemática y objetiva dentro de cualquier oportunidad tecnológica en las áreas de Explotación, Producción y cualquier otra relacionada al negocio, a partir de un software diseñado para tal fin.

La metodología de Evaluaciones de Opciones Tecnológicas comprende seis fases:

1. Adaptación metodológica.

2. Selección y ponderación de criterios generales.
3. Definición y selección de criterios específicos.
4. Ponderación de criterios generales.
5. Evaluación y jerarquización de opciones tecnológicas.
6. Ponderación de criterios específicos.

Dentro de las fases mencionadas la metodología planteada realiza una evaluación cualitativa de diferentes opciones tecnológicas a través del software basado en Matrices de Evaluación, con información suministrada por la consulta a especialistas del área correspondiente.

Ésta enfoca la evaluación a partir de criterios generales, las cuales tienen en consideración condiciones de conocimiento y aprendizaje de las tecnologías, entorno estratégico, condiciones tecnológicas del área, riesgos e impactos de implantación y valor agregado financiero que genera el área / empresa (Escalona, 2000).

Una vez efectuada la identificación y descripción detallada de una oportunidad tecnológica en cualquier área de la organización, el responsable de la misma será el encargado de la aplicación de la metodología, en forma individual o conformando un grupo de trabajo.

Para ello identificará los especialistas idóneos, definiendo la lista de participantes dentro de la evaluación, dará a conocer a cada especialista los principales aspectos de la metodología incluyendo el propósito.

El encargado de la metodología mantendrá comunicación con el grupo de especialistas a través de un proceso de encuesta aislada, para evitar previo acuerdo o sesgos de las respuestas dentro del grupo. El responsable de la evaluación cuenta con la asesoría y colaboración del facilitador de tecnología cuando así lo requiera.

Finalmente, el responsable del área presentará la jerarquización del grupo de opciones tecnológicas bajo estudio, luego del desarrollo de las diversas fases en

que se estructura la metodología, las cuales incluyen análisis y apreciación cualitativa de los especialistas, así como también el apoyo en las herramientas estadísticas y financieras que permiten la correlación y validación de la información obtenida facilitando la toma de decisiones.

Las características más resaltantes de la metodología descrita son:

Se enfoca hacia la resolución de evaluaciones de tecnologías complejas que ameriten el tiempo y esfuerzo que el proceso metodológico conlleva.

Es un procedimiento flexible, porque es posible simplificarlo cuando las condiciones del caso y el criterio del responsable de la evaluación lo consideren necesario.

Aplica para casos de evaluación de paquetes tecnológicos en conjunto, así como para cada uno de los componentes del paquete tecnológico por separado, según sean los requerimientos.

El análisis del modelo se enfocara de acuerdo a las ventajas y limitaciones que el mismo presenta.

#### Ventajas:

1. Emplea una herramienta gerencial para la toma de decisiones, uso de un software y creación de un equipo de trabajo que se denomina Sistema de Inteligencia Tecnológica (SIT).
2. Es una herramienta poderosa para desagregar paquetes tecnológicos, seleccionar distintas opciones tecnológicas, establecer criterios generales y específicos.
3. Su fundamentación técnica es de tipo estadístico, se analiza tomando en consideración los diferentes modelos de distribución y aplicación donde es necesario manejar grandes volúmenes de información.
4. Su metodología es lógica, sistemática con rigor científico y esquemas gerenciales actualizados y empleado en la industria petrolera nacional e internacional.

5. Se requiere el uso de especialistas de alto nivel científico y tecnológico y con experiencia en el área que se esté analizando.

Limitaciones:

1. Inexistencia de la evaluación económica en la toma de decisiones de la matriz de opción tecnológica.
2. La metodología no está adaptada a la Selección Óptima de los Sistemas de Levantamiento Artificial.
3. Pocos especialistas, tanto a nivel nacional como internacionalmente, en el área de levantamiento artificial y en concreto en la selección de sistemas de levantamiento artificial (Escalona, 2000).
4. Carencia de adaptación de la metodología en campos venezolanos y no hay experiencia internacional.
5. Aparentemente pudiese ser poco práctica la manera de efectuar las consultas, la búsqueda de consenso, elaboración de planilla, etc. (Ob. Cit)
6. Los criterios se enfocan más hacia una decisión de tipo gerencial que de carácter técnico.

En síntesis, a pesar de ser una herramienta poderosa, con innegables ventajas, se requiere llevarla a la práctica y adaptarla a la selección óptima de los sistemas de levantamiento artificial.

### **2.6.2 Sistema Experto de Levantamiento Artificial**

Los sistemas expertos son programas de computación que tienen por finalidad reflejar el comportamiento o razonamiento de los expertos que no son más que personas a quienes le corresponden recomendar las decisiones o acciones a tomar en las distintas actividades profesionales del hombre, basados en su entrenamiento experiencia y práctica profesional.

Su estructura básica está conformada por elementos entre el sistema y el usuario los cuales son:

1. La base del conocimiento: la cual almacena los hechos que reflejan la experticia del sistema.
2. La fuente de inferencias: que contiene la interpretación del comportamiento (razonamiento) y el control de búsqueda de soluciones y respuestas.
3. La interface: la cual provee al usuario el lenguaje a través del cual recibe dichas respuestas.

El desarrollo de los sistemas expertos en el área de levantamiento artificial tiene un gran potencial ya que la selección de los sistemas de levantamiento artificial representa una difícil labor frente ante la amplia gama de tecnologías de levantamiento existentes en la actualidad.

El sistema experto de levantamiento artificial (SEDLA), almacena en una base de conocimiento la experticia de un grupo de especialistas, para seleccionar doce Métodos de Levantamiento Artificial.

La adquisición de la mencionada base del conocimiento, se realizó mediante entrevistas y cuestionarios a diez expertos mundialmente reconocidos, quienes aportaron su pericia y conocimiento en los distintos métodos de levantamiento artificial, originando la base de datos de SEDLA.

El SEDLA es un programa interactivo estructurado en tres módulos principales y una base de datos, los cuales por encontrarse interconectados, permiten el flujo de información a través de cada uno de ellos. Los módulos principales son:

1. El Módulo de Preselección.
2. El Módulo de Diseño.
3. El Módulo de Evaluación Económica.

#### Modulo de Preselección Técnica

Es el módulo de evaluación técnica o módulo experto, incluye la base de conocimientos. Este módulo permite jerarquizar de acuerdo a la factibilidad técnica, la aplicación de cada método de levantamiento artificial por separado, considerando un conjunto de factores de carácter cualitativo, cuantitativo y de

problemas de producción, Cada uno de estos factores tienen asociado un peso el cual es mayor o menor dependiendo del grado de importancia. Para cada método de Levantamiento Artificial en particular, los factores antes mencionados son evaluados de acuerdo con los datos suministrados del pozo en estudio.

Con el resultado de esta evaluación y con el peso de cada criterio se le asigna una puntuación a cada método; siendo 100% el máximo valor posible, al mismo tiempo se van registrando las ventajas y advertencias que podrían afectar el desempeño del método o en última instancia descartar su factibilidad técnica. La figura 2.9 muestra el esquema del módulo de preselección.

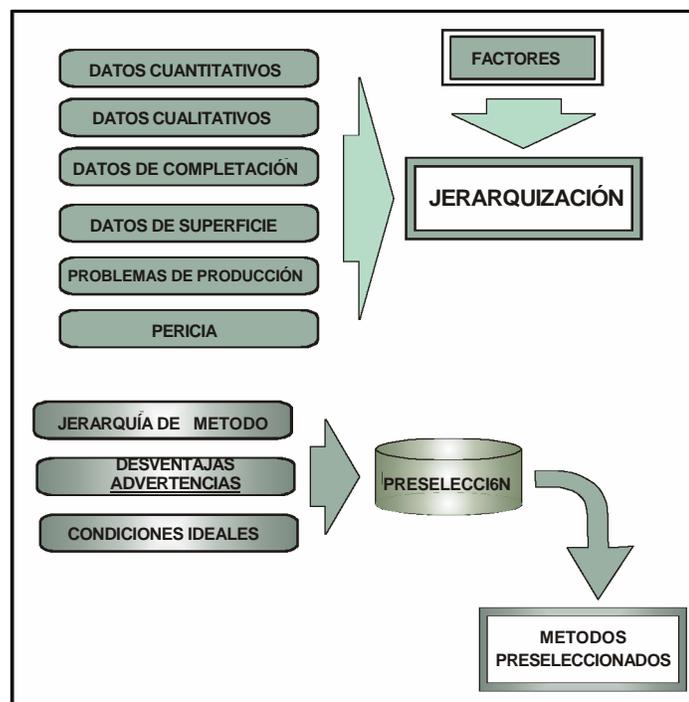


Figura 2.9: Esquema del módulo de preselección. Reyes (1999).

Al finalizar la evaluación de los métodos, el sistema muestra una lista jerarquizada de cada uno de ellos, y cada una de las desventajas generadas en las condiciones en la que se encuentra el pozo.

### Módulo de Diseño

Este módulo tiene como finalidad asistir al ingeniero en el diseño de los diferentes equipos que conforman los métodos de levantamiento artificial, de acuerdo con las sugerencias realizadas en el módulo anterior. Empleando una serie de

programas especializados o simuladores desarrollados para cada uno de los métodos. Para cada programa de diseño son solicitados al usuario datos adicionales que no fueron introducidos para la preselección. El resultado obtenido en dimensionamiento de los equipos lo muestra en forma numérica y en algunos casos completados con gráficas.

### Modulo de Evaluación Económica

El módulo evalúa el método en términos económicos visto como proyecto de inversión. En la línea con los resultados del diseño, con los costos unitarios de los equipos y a partir de parámetros económicos establecidos (año de base de estudio, horizonte económico, y paridad cambiaria), se calculan los indicadores económicos de importancia para el proyecto en el horizonte económico indicado, los cálculos se realizan en dólares constantes para el año base de estudio y sin tomar en cuenta la inflación. Los indicadores económicos que permite calcular el SEDLA son: Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Neto (VPN) y Eficiencia de Inversión (EI). Además el modulo permite visualizar de manera tabular la información de costos de: servicios, mantenimiento, seguros, gastos de operación, contingencias, depreciación, regalías, ingresos, impuestos y flujo de caja. En la figura 2.10 se observa el esquema del modulo de evaluación económica.

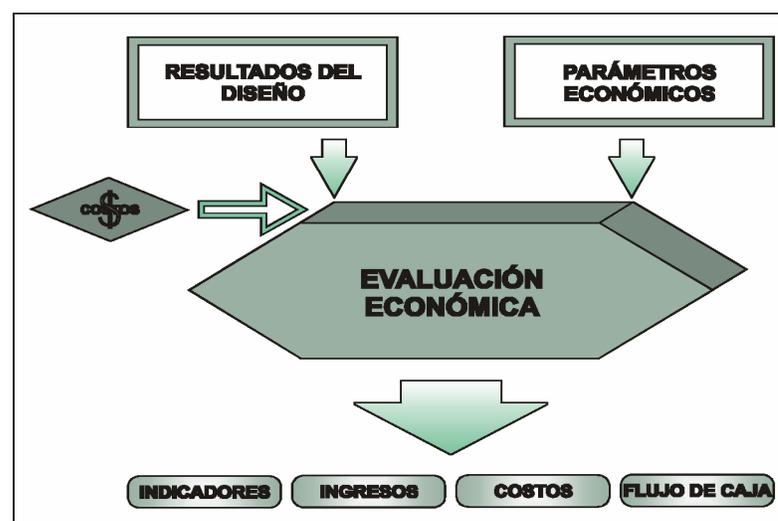


Figura 2.10: Esquema del modulo de evaluación económica.

## Base de Datos

La base de datos permite manejar las diferentes tablas empleadas por el SEDLA, las cuales se detallan a continuación:

Los Catálogos: Almacena la información de los equipos de subsuelo y superficie, las estructuras y sus especificaciones técnicas, los equipos de servicios, gastos de producción, áreas geográficas y métodos de levantamiento artificial. Los catálogos están agrupados en combinaciones y listas de costos unitarios. En las combinaciones se muestra la selección entre los métodos de levantamiento y los distintos equipos y servicios que necesita. Las listas de costos unitarios contienen los costos de cada uno de los equipos involucrados en cada método de levantamiento.

Factores y Parámetros del Modulo de Preselección: estas tablas contienen los factores y parámetros que forman la base del conocimiento en el método de preselección técnica, las cuales relacionan la experticia del sistema.

La importancia de la base de datos radica en permitir realizar actualizaciones y consultas, obteniendo una mayor representación de la realidad en las evaluaciones.

### **2.6.2.1 Análisis del Sistema Experto de Levantamiento Artificial**

El SEDLA, como sistema experto tiene la ventaja de ser el único procedimiento de optimización con módulo de evaluación económica el cual es de vital importancia ya que permite sustentar la decisión técnica de la optimización de los sistemas de levantamiento artificial (Escalona 2000).

En el módulo de experto o de preselección incorpora mejoras en: evaluaciones, actualizaciones, correcciones a las reglas de preselección y mejoras a la estructura de la base de conocimientos, mediante la incorporación de parámetros que reflejan avances técnicos y pericias adquiridas en los métodos de levantamiento artificial.

Se destacan entre los parámetros cuantitativos: profundidad y temperatura al tope de las perforaciones, índice de productividad, relación gas líquido de formación,

tasa de producción bruta, corte de agua y presión estática del yacimiento (Ob. Cit:).

Entre los parámetros cualitativos se tienen: Ubicación del pozo, volumen de gas disponible, disponibilidad de fuente eléctrica y necesidad de adaptación del método de declinación, otros datos más relevantes en el módulo de preselección son el tipo de completación (simple, doble o selectiva), la longitud (0 a 20000'), el diámetro nominal del revestidor (2 3/8" a 10") y el diámetro nominal de loseductores (2 3/8" a 4 1/2").

Tiene la flexibilidad en cuanto a su constante modificación y a la redefinición del problema incorporando nuevas experiencias adquiridas en el tiempo y en consecuencia le da la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías y/o mejoras tecnológicas de los distintos equipos de levantamiento, lo cual conlleva a una revisión periódica en el módulo de diseño para incorporar esas mejoras. También se hace necesario la revisión la base de datos en especial con relación a los catálogos, lo cual requiere una actualización continua en los precios y una revisión indirecta en la base de conocimientos (Ob. Cit:).

En cuanto a las desventajas que presenta el sistema se tiene que su uso tanto en pozos inclinados como en pozos horizontales es limitado, no considera la inyección de diluentes en la producción de crudos pesados y extra pesados, así como también la vinculación existente entre el pozo / yacimiento por no tomar en cuenta los mecanismos de producción de los yacimientos (empuje hidráulico, gas en solución, presencia de capa de gas, y la nueva teoría de los crudos espumantes), factores que son importante a nivel de yacimiento pero que tienen una fuerte incidencia en la producción de un pozo y en la construcción de la curva de gradiente para la determinación del IPR.

### **2.6.3 Metodología de Selección Óptima de Levantamiento Artificial**

Es un programa que está desarrollado bajo las técnicas de programación más versátiles que proporciona el ambiente gráfico windows 95 y windows 98, para la selección de sistemas de levantamiento artificial y cuya finalidad es suministrar al

usuario una herramienta de evaluación de los diferentes métodos de producción empleados comúnmente para el desarrollo de cualquier campo petrolero y lograr un mejor desempeño de los mismos.

El modelo se fundamenta principalmente en la evaluación de quince (15) criterios para la selección de cinco de los Sistemas de Levantamiento Artificial más comunes los cuales fueron descritos en este capítulo.

Los criterios evaluados en este programa son:

1. Índice de Productividad (IP).
2. Tasa de Líquido (Q)
3. Corte de Agua (%W)
4. Relación Gas Líquido (RGL)
5. Profundidad (D)
6. Presión de Yacimiento (Pyac)
7. Gravedad API ( $^{\circ}$ API)
8. Temperatura (T)
9. Producción de Arena (Are. P.)
10. Mecanismos de Producción (Mec. P.)
11. Localización (Loc. P.)
12. Fuente de Energía Disponible (FED)
13. Plataforma de Producción del Pozo (Plat. P.)
14. Pericia del Método (Per. M)
15. Diámetro de Tubería (Diam. T.)

La ponderación y jerarquización de los criterios la realiza el programa utilizando la metodología del Proceso Analítico Jerárquico el cual se describe en la primera parte de este capítulo, al igual que la exploración de zonas de aplicabilidad de

ciertos criterios en un determinado método de producción, a través de Las Curvas de Valoración.

Es una herramienta de aprendizaje y de soporte para la toma de decisiones, a la cual el usuario puede modificar ciertos criterios de acuerdo a su experiencia o adelantos en el área, así como también incorporar otros, con el objeto de dar una respuesta más acertada en la selección de un método en particular.

## **2.7 Criterios que Afectan la Selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial**

De la discusión general presentada se concluye que existen numerosos criterios que afectan la selección de los sistemas de levantamiento artificial. A continuación se señalan cuales son los criterios que tienen mayor peso y cómo influyen en dicha selección.

Los Criterios referentes a las características de producción son:

### **2.7.1 Comportamiento de Afluencia:**

Es la habilidad del yacimiento para producir fluidos. Es un factor crítico en la selección de los mencionados sistemas. La capacidad de producir fluidos en el presente a una fecha futura con o sin estimulación, puede considerarse en la decisión para optimizar el sistema de levantamiento.

### **2.7.2 Tasa de Producción de Líquido:**

La tasa de producción requerida para un pozo en particular es el parámetro más importante en la selección del método de levantamiento y debe tomarse como uno de los principales criterios para los cuales se rige la producción. La tasa de producción puede ser evaluada en las curvas de influjo y eflujo, ya que estas indican el comportamiento de afluencia de los fluidos hacia el pozo.

Cuando se desea levantar altos volúmenes de líquidos la bomba electrosumergible resulta ser la mejor opción ya que han sido diseñadas para tal fin, teniendo como principales limitaciones la potencia requerida y el diámetro del revestidor. Para cubrir altos requerimientos de potencia se puede emplear

motores tipo tándem (motores conectados en serie), aunque estos representa un incremento de costos.

La bomba electrosumergible es capaz de producir hasta 50.000 B/d. Sin embargo para tasas menores de 300 B/d, resulta antieconómico instalar este tipo de bombas y aunque sea técnicamente factible es preferible utilizar otro método de levantamiento artificial que justifique su instalación.

### **2.7.3 Temperatura de Fondo:**

Las limitaciones por elevada temperatura de fondo se deben fundamentalmente a problemas por daño de los equipos de fondo que no están fabricados con materiales resistentes a esas condiciones de temperatura.

Cuando se manejen temperaturas de fondo superiores a 200 °F, el sistema más afectado y el cual no debe emplearse como método de producción es la bomba de cavidad progresiva, ya que el elastómero debe poseer una resistencia térmica adecuada para soportar las condiciones de temperatura características de pozo. Si la bomba opera a temperaturas superiores al límite máximo de servicio, generalmente produce rigidización, fragilización y degradación térmica del elastómero.

En la bomba electrosumergible, este es un parámetro de gran relevancia para los componentes del sistema, ya que en condiciones de alta temperatura, se determinaron los sellos de la bomba y la cubierta de los conductores. Además altas temperaturas pueden originar que alguna fase presente en corto circuito, causado a los cables y al motor. Esta situación ha sido solventada en algunos casos por la incorporación al mercado de nuevas tecnologías.

De igual manera, tanto el bombeo hidráulico jet, como pistón operan eficientemente hasta 500 °F, aproximadamente, pero se requiere que los equipos estén fabricados con materiales resistentes a alta temperatura.

En pozos con altas temperaturas de fondo se propone cualquiera de los métodos de levantamiento artificial por gas, ya que estos no son susceptibles de ser

afectados por esas condiciones, así como también el bombeo mecánico convencional.

#### **2.7.4 Relación Gas / Líquido:**

La producción de gas / petróleo y, por consiguiente de gas / líquido, influyen, en la selección de los equipos de levantamiento artificial y en particular en el diseño de los mecanismos de levantamiento. Como una regla general, todos los sistemas de levantamientos tienden a reducir la eficiencia con el incremento de la relación gas / líquido.

El levantamiento con gas en flujo continuo puede ser recomendable si el gas producido por la formación no es excesivo, es decir si la inyección adicional de gas puede aliviar la presión, en caso contrario, la adición de más gas incrementará la presión de fondo fluyente y el resultado será menos eficiencia de levantamiento.

El problema que se presenta con la relación gas / líquido puede enfocarse a nivel de formación o la relación de gas libre a la entrada de la bomba.

##### **2.7.4.1 La relación Gas - Líquido de Formación**

Se define como el volumen total de gas producido entre el volumen de líquido producido. Es un factor significativo en la selección del método de levantamiento, si altos volúmenes de gas pasan a través del mecanismo de levantamiento produce una disminución de la capacidad de levantamiento de líquido para sistemas de bombeo, quedando aquellos métodos que involucren las de levantamiento como las mejores opciones.

Los sistemas de LAG son recomendables para producir pozos con altas RGL, ya que el gas de formación ayuda al levantamiento de los fluidos. Altas relaciones Gas/Líquido minimiza los requerimientos de gas de inyección para los sistemas de gas lift tanto continuo como intermitente, sin embargo, para los sistemas de LAG intermitente, la RGL excesivamente alta, puede originar tiempos de formación de tapones líquidos muy largos.

El gas que se produce conjuntamente con el petróleo crea problemas en el bombeo mecánico convencional tanto en la bomba de subsuelo como en las instalaciones de superficie. Con respecto a las instalaciones, se tiene que un petróleo muy volátil y la merma del crudo en su trayectoria desde el subsuelo al tanque, hacen que el petróleo en superficie represente una fracción de barril en condiciones de subsuelo. Este último sistema se emplea para RGL muy bajos, menores a 200 PC/BI aproximadamente.

#### **2.7.4.2 La relación Gas Libre a la Entrada de la Bomba**

Se refiere a la cantidad de gas que no se encuentra disuelto en el petróleo. El gas libre en altas proporciones a la entrada de la bomba resulta un severo problema para la mayoría de los sistemas de bombeo, por la disminución de la eficiencia de la bomba.

En el sistema de bombeo hidráulico jet, a medida que la relación gas libre va creciendo, la cantidad de gas manejada por la bomba también irá incrementándose, ocasionando una reducción de la eficiencia del equipo, esto trae como consecuencia un aumento de la cantidad de fluido de potencia inyectado para mantener la tasa de producción y el incremento de las pérdidas por fricción. La alta velocidad que maneja la bomba jet (200 a 300 pies/seg) a la entrada de la garganta, comúnmente origina la presencia del problema de la cavitación en estos equipos y aunque se ha demostrado que la erosión causada por la cavitación es muy pequeña, no se debe descuidar este proceso porque la eficiencia del equipo disminuye notablemente ocasionando la destrucción y pérdida de la bomba a largo plazo.

En instalaciones de bombeo hidráulico tipo pistón, se maneja cierta cantidad de gas en instalaciones de bomba fija o libre, permitiendo el venteo de gas en forma adecuada con un separador de gas en el fondo del pozo a la entrada de la bomba. Las bombas libres de revestidores están limitadas a bajas RGL, aunque el efecto del incremento del gas libre a la entrada de la bomba no parece tan drástico como en el bombeo hidráulico tipo Jet.

En las bombas electrosumergibles, la presencia de gas libre es un parámetro que representa uno de los problemas más controversiales al momento de seleccionar o dimensionar el sistema de levantamiento. El paso de gas libre a través de las etapas de la bomba disminuye su capacidad de levantamiento y puede ocasionar bloque por gas, capaz de quemar el motor de fondo. Si una bomba centrífuga es utilizada para mantener un fluido bifásico (crudo y gas), su comportamiento se hace inestable y difícil de predecir, hasta que ocurre un bloqueo por completo de flujo, a medida que el gas es introducido al sistema como una fase libre. El cambio de comportamiento de la bomba, es función de la presión de entrada y de la cantidad de gas que entra a la misma. Para un porcentaje de gas libre fijo, el deterioro en la capacidad de levantamiento (altura dinámica) del equipo, será menor si se incrementa la presión de entrada. Con el propósito de ampliar la ventana de aplicación de este método a nivel mundial, se ha desarrollado con éxito nuevas tecnologías capaces de reducir las limitaciones presentadas.

El bombeo mecánico convencional, emplea separadores o anclas de gas diseñadas de acuerdo a las necesidades del la bomba, para ventear el gas por el espacio anular, disminuyendo el efecto del gas libre a la entrada de la misma.

A diferencias de otros sistemas de bombeo, las BCP permiten el manejo de fluidos con alto contenido de gas, sin embargo las bombas no pueden operar en seco por la fricción entre el rotor y el estator ya que produce fragilización y quemaduras en el estator. El funcionamiento de la bomba requiere una cantidad de fluidos que actúen como lubricantes, lo cual disminuye la fricción y el calor generado por dicho efecto. El manejo de fluido con alta relación de gas libre, requiere utilizar un diseño con elevada eficiencia volumétrica y bajos diferenciales de presión por etapas, es decir, con mayor numero de etapas en la bomba.

### **2.7.5 Corte de Agua**

El corte de agua influye directamente en la tasa de producción total, por ejemplo, muchos pozos pueden producir 2000 Bls o más de agua en orden de obtener 100 Bls o menos de petróleo. Altos cortes de agua afectan el comportamiento de afluencia debido al efecto de permeabilidades relativas. El agua cuando se

compara con el petróleo resulta en una pérdida de presión adicional en la tubería debido a su mayor densidad. Altos cortes de agua reducen la relación Gas/Petróleo, además de inducir altos volúmenes de producción por el levantamiento.

Entre los criterios debido a las propiedades de los fluidos que más se destacan están:

### **2.7.6 Viscosidad y °API**

Como una regla general, viscosidades menores de 10 cps. (mayor de 30 °API) no son un factor determinante del sistema de levantamiento a utilizar. La gravedad API aumenta a medida que el crudo es más liviano y disminuye para los más pesados y extra pesados. El proceso de levantamiento se dificulta a medida que la gravedad API es menor, por el aumento de la viscosidad del mismo.

El manejo de crudos altamente viscosos genera problemas en los sistemas de bombeo mecánico, tales como altas pérdidas por fricción, reducción de la eficiencia de las emboladas, sobrecarga de las cabillas y aumento del efecto de la flotabilidad de las mismas. La gravedad API determina el peso del fluido sobre la bomba y afecta el torque máximo aplicado sobre la barra pulida. A bajas tasas de producción y con inyección de diluentes es posible reducir crudos de baja gravedad API.

En cuanto a las bombas electrosumergibles, el efecto de la viscosidad en el comportamiento de una bomba centrífuga, se debe a la alta resistencia que tienen los fluidos viscosos a fluir. Consecuentemente las pérdidas por fricción en los discos y en la tubería se incrementan, lo cual trae como resultado un aumento de la energía requerida por el equipo y la disminución de la capacidad de levantamiento.

El uso de los sistemas por levantamiento artificial por gas con fluidos muy viscosos, puede causar problemas adicionales como consecuencia del efecto de enfriamiento de la expansión del gas, además de que resulta muy difícil levantar una columna de crudo pesado solo con un tapón de gas.

Los métodos de bombeo hidráulico pueden ser empleados para producir crudos de baja gravedad API, ya que junto al fluido de potencia es posible inyectar diluentes al pozo, para reducir la viscosidad de los fluidos. Este fluido adicional puede incrementar los costos de operación.

Las bombas de cavidad progresiva no presentan ningún problema respecto a la baja gravedad API del crudo, ya que generalmente por su composición, los crudos pesados causan menos efectos dañinos que los livianos. Los crudos livianos están constituidos por especies moleculares, las cuales son compatibles con el elastómero que pueden penetrar el material originando problemas de hinchamiento, el cual se caracteriza por un incremento de la interferencia rotor – estator y como consecuencia se origina un aumento de torque, en casos muy severos el giro del rotor puede llegar a desgarrar el estator provocando su destrucción. El material elastomérico, debe ser capaz de resistir la acción de fluidos altamente aromáticos o con alto contenido de sulfuro de hierro, sulfuro de hidrogeno, dióxido de carbono o salmuera, dependiendo de las condiciones del pozo.

Las características del hoyo tienen un efecto controlador en la determinación del sistema de Levantamiento artificial, los criterios relacionados con estas características son:

### **2.7.7 Profundidad**

La profundidad del pozo es un criterio limitante en la aplicación de los sistemas de levantamiento. El caudal de producción deseado depende de la profundidad del pozo y en el caso de los métodos de bombeo dependen de la profundidad de asentamiento de la bomba. Además de la tasa de producción existen criterios como la gravedad API y la Temperatura que también se ven influenciados por la profundidad. A mayores profundidades incrementan los problemas operacionales (requerimientos de potencias, rotura de cabillas, daño en cables, resbalamiento en líquido, etc.)

El bombeo mecánico convencional aplica en pozos medianamente someros, aunque la bomba de subsuelo como tal es capaz de levantar fluidos a grandes profundidades, pero factores como la potencia, la longitud de las emboladas, la longitud y el esfuerzo sobre las cabillas, la carga y la fricción limitan el diseño. La profundidad determina los esfuerzos a los que serán sometidos los equipos de producción durante el ciclo de bombeo y en base a estos se seleccionan los materiales que constituirán los equipos, de acuerdo a los esfuerzos de cedencia en los materiales que constituyen la bomba. Dependiendo del caudal de producción es posible levantar crudos aproximadamente hasta 10.000 pies. En el sistema electrosumergible la profundidad de operación es una de las principales limitaciones. La instalación de una bomba electrosumergible a grandes profundidades no resulta eficiente, por los requerimientos de potencia y las altas temperaturas, para los cuales muchos equipos de fondo no son resistentes. Es por ello que se debería considerar la instalación de este método en pozos con profundidades que no excedan los 13.000 pies.

En las bombas de cavidad progresiva, la profundidad también representa una de limitación importante para su instalación, ya que a mayores profundidades aumentan los problemas operacionales, debido a los esfuerzos sobre las cabillas. Este método opera efectivamente a profundidades menores de 7.000 pies.

Los sistemas de producción por levantamiento artificial por gas son aplicables preferiblemente en pozos pocos profundos, ya que los requerimientos de presión de inyección, el caudal de gas de inyección y de compresión del mismo, aumentan a mayores profundidades. El método de inyección de intermitente gas con pistón metálico es la excepción, ya que aplica en pozos hasta de 12.000 pies de profundidad donde las pérdidas por resbalamiento son mayores y se hace necesaria la instalación de un pistón.

El método de LAG continuo produciendo tanto por la tubería como por el espacio anular opera eficientemente hasta 10.000 pies de profundidad. Para la cámara de acumulación, el flujo pistón, el LAG intermitente convencional se recomienda su instalación en pozos poco profundos.

En cuanto a los sistemas hidráulicos es conveniente mencionar, que a grandes profundidades son aplicables operacionalmente los métodos de bombeo hidráulico Jet y pistón, pero presentan ciertas limitaciones de tipo económico que podrán impedir la instalación de los mismos. Estos equipos son capaces de levantar fluidos a profundidades de 20.000 pies, sin embargo, para profundidades menores de 5.000 pies y mayores de 15.000 pies, no se justifica económicamente, ya que en pozos profundos es preferible utilizar un método de levantamiento artificial tradicional, que resulta más económico y del cual se tenga mayor pericia.

### **2.7.8 Diámetro del Revestidor**

El diámetro del revestidor es determinado de acuerdo al tamaño del hoyo en etapas preliminares de un programa de perforación. Muchas variables determinan el diámetro del revestidor, para un pozo en particular en un área particular, tales como los problemas de hoyo (zonas de presiones anormales, zonas cienagosas, pérdida de circulación, flujo salobre, etc.) y el precio de la tubería entre otras.

El diámetro del revestidor influye en la selección del sistema de levantamiento dependiendo de factores como las pérdidas por fricción, la facilidad de introducir los equipos de fondo, la tasa de producción del pozo.

El Bombeo hidráulico Jet, su uso resulta muy ineficiente desde el punto de vista operacional debido a la instalación de revestidores con diámetros muy pequeños, por las altas pérdidas por fricción de los fluidos de potencia y de producción en un área muy reducida. De forma similar en el bombeo hidráulico tipo pistón se requieren revestidores de gran diámetro tanto para sistemas cerrados y libres. El diámetro del revestidor debe estar de acuerdo a requerimientos del pozo como son las completaciones dobles y la instalación de tuberías de venteo de gas entre otros. El diámetro mínimo recomendado para este tipo de sistema es de 7 pulgadas aproximadamente.

Para el bombeo electrosumergible, el diámetro del revestidor se ve limitado por el tamaño del motor y de la bomba. Considerado este método es apto para producir

a altas tasas, es necesario contar con un diámetro de revestidores que permitan la instalación de bombas adecuadas, las cuales son de mayores dimensiones a medida que el caudal requerido aumenta.

Cuando se produce un pozo por bombeo mecánico convencional, un diámetro de revestidor pequeño puede limitar la separación de gas libre, por eso se recomiendan revestidores de gran diámetro. También si se debe producir alta tasa, con bombas de pistones de grandes dimensiones, se requieren grandes diámetros.

En el LAG continuo no representa mayor problema, siempre y cuando permita obtener la producción directa. Tal que para sistemas derivados al LAG intermitente, es indiferente por los bajos caudales de producción.

Las instalaciones de revestidores de diámetros relativamente pequeños pueden impedir que se obtengan las tasas de flujo deseadas, limitar las dimensiones del equipo de recuperación así como también el diámetro externo de la tubería de producción además de restringir el uso de las completaciones múltiples.

### **2.7.9 Diámetro del Eductor**

Al igual que el diámetro del revestidor, el diámetro del eductor está relacionado con factores tales como el tamaño de las bombas y los motores de fondo a instalar, la tasa de producción deseada, el origen de pérdidas por fricción, etc. Es importante que el diámetro del eductor se mantenga constante a lo largo de la profundidad del pozo.

En el bombeo electrosumergible, el caudal requerido determina la bomba que se va instalar, y ésta a su vez el diámetro de la tubería de producción. Cuando la tubería se encuentra instalada en el pozo, es ésta la que permite o no emplear determinado tamaño de bomba y en consecuencia, obtener el caudal de producción deseado.

En pozos donde se desea instalar sistemas con bombeo mecánico convencional, el diámetro de la tubería de producción que generalmente se emplea es de 2 7/8 pulgadas o mayor, aunque existen bombas de subsuelo para tuberías de 2 3/8

pulgadas. Sin embargo no se recomienda el empleo de éstas, ya que limitan la producción a tasas muy bajas y generan altas fricciones.

Para el método del pistón metálico convencional el diámetro del eductor debe adaptarse básicamente al diámetro del pistón, los diámetros del eductor más empleados son 2 3/8" y 2 7/8", las cuales representan la mejor opción.

Los criterios referentes a los problemas de producción también inciden en la selección de los equipos de levantamientos, entre estos se encuentran:

### **2.7.10 La Producción de Arenas**

La producción de arenas causa problemas de erosión en todos los tipos de sistemas de levantamiento, la abundancia de arena en el tope de las bombas se subsuelo puede causar problemas al tratar de recuperar estas.

El bombeo mecánico convencional no puede manejar más de un 0,1% de arena con bombas especiales, y la bomba electrosomergible requiere menos de 200 ppm de sólidos, mientras que el fluido de potencia de los métodos de bombeo hidráulico deben trabajar con menos de 10 ppm de sólidos y se pueden considerar la inyección de agua fresca para solucionar problemas de levantamiento. Por todo esto los métodos que pueden ser recomendados para pozos con alta producción de arenas son las bombas de cavidad progresivas y los sistemas de levantamiento artificial por gas. La BCP puede manejar aproximadamente un 50% de arena de crudos viscosos. Los métodos de LAG son excelentes en pozos con problemas de arenas, ya que son los únicos sistemas de levantamiento que no necesitan que el fluido cargado de arena pase a través del mecanismo móvil. Sin embargo en LAG intermitente se pueden presentar problemas con la válvula de retención.

### **2.7.11 Parafina y Asfáltenos**

La mayoría de los pozos con alta producción de parafinas y asfáltenos, tiene tendencia a la deposición de estos sólidos en el cabezal y en las partes superiores de la tubería de producción donde la presión y la temperatura son menores, causando la contrapresión y llegando incluso a tapar por completo el pozo.

Para evitar que esto suceda es necesario remover ó prevenir la formación de parafinas. Las cabillas de succión tienen una ventaja sobre los otros métodos de levantamiento artificial ya que estas proporcionan una acción continua de roce.

Los raspadores pueden ayudar a remover la parafina del pozo. Los pistones sirven como raspadores de parafinas. Los sistemas hidráulicos permiten circular fluidos a altas temperaturas e inhibidores para eliminar las parafinas.

#### **2.7.12 Escamas**

La acumulación de escamas produce la reducción del diámetro interior de las tuberías disminuyendo su capacidad. El levantamiento artificial por gas puede agravar la acumulación de escamas por los cambios de temperatura que se producen a nivel de las válvulas, originando la precipitación de las mismas. En los métodos de bombeo mecánico e hidráulico, se pueden prevenir mediante tratamiento con aditivos químicos por el anular en el bombeo mecánico y junto con el fluido de potencia en el hidráulico, proporcionando a la bomba mayor vida útil y asegurando la capacidad normal de la tubería. Los pistones ayudan también a mantener limpia la tubería, aunque el ciclo de producción normal puede verse interrumpido por el tratamiento del pozos.

#### **2.7.13 Corrosión**

La corrosión en el fondo del pozo puede ser causada por la electrólisis entre diferentes tipos de metales, la presencia de H<sub>2</sub>S ó de CO<sub>2</sub> en el fluido producido, presencia de salmuera ó por la oxigenación de metales. Las cabillas de bombeo presentan problemas de debilitamiento por presencia de H<sub>2</sub>S y cuando están excesivamente cargadas se acelera el quiebre de las mismas. Si en el LAG el gas inyectado es corrosivo, debe ser deshidratado adecuadamente.

#### **2.7.14 Emulsiones**

Resulta difícil anticipar los problemas de emulsiones cuando se va a seleccionar el sistema de levantamiento artificial para un pozo. Las emulsiones ocasionan altas pérdidas de presión en la tubería, y en general, se requiere mayor potencia ya que se reduce la eficiencia de cualquiera de los sistemas de levantamiento.

Para el LAG es difícil levantar emulsiones ya que se requiere mayor cantidad de gas de inyección. Otro mecanismo para levantar una emulsión es a través del uso de pistones.

### **2.7.15 Grado de Desviación del Hoyo**

Un alto grado de desviación del hoyo afecta de gran manera la selección del tipo de sistema levantamiento a instalar. En el bombeo mecánico convencional y en bombas de cavidad progresiva, se incrementan los problemas de carga y el deterioro de los equipos.

Se pueden instalar bombas electrosumergibles e hidráulicas en pozos desviados, siempre y cuando la bomba pueda cerrar libremente a través de la tubería.

El LAG es el método de levantamiento por excelencia para pozos desviados, las válvulas son cambiadas con guaya fina sin problema hasta 70° de desviación, a pesar de hacerse necesario consideraciones especiales dado que en hoyos desviados el gradiente bifásico cambia respecto a los pozos verticales.

Otros criterios relevantes que afectan la selección de los sistemas de levantamiento artificial son:

### **2.7.16 Pericia de Campo**

La capacidad técnica del personal de operaciones de campo puede influir en la selección del sistema de levantamiento. El bombeo mecánico convencional presenta operaciones de menor dificultad para el personal de campo, respecto a métodos como LAG y bombeo hidráulico. En muchos casos la falta de pericia en ciertos métodos de levantamiento se traduce en un incremento de los costos.

### **2.7.17 Localización del Pozo**

Factores como la ubicación del pozo (zona urbana, no urbana ó costa afuera), la disponibilidad del volumen de gas de inyección y las fuentes de electricidad, son importantes para la selección del sistema de levantamiento artificial.

Las plataformas costa afuera están limitadas al espacio disponible en superficie. Todos los sistemas de levantamiento pueden ser usados en pozos costa afuera,

sin embargo, para unidades de bombeo mecánico convencional se necesita un área mayor para el cabezal en superficie, además de verse afectado por el ambiente corrosivo costa afuera y causar vibraciones. Los sistemas de LAG (siempre que existan las instalaciones de compresión de gas) y de bombeo hidráulico tienen gran aplicación en pozos costa afuera. Si se dispone de fuentes de electricidad el bombeo electrosumergible también puede ser instalado.

En áreas urbanas ó con poblaciones cercanas, deben considerarse factores como la seguridad y la contaminación ambiental. En estos casos los sistemas más recomendables son las BCP y las BES. En zonas no urbanas se recomienda los balancines por el espacio que ocupan y los sistemas de levantamiento hidráulico por las altas presiones manejadas en superficie.

Para el bombeo electrosumergible, el bombeo mecánico convencional y las bombas hidráulicas se tienen requerimientos especiales de suministro de energía eléctrica. Para las bombas electrosumergibles es condición necesaria que el voltaje suministrado sea estable. Todos los métodos de LAG necesitan disponibilidad del gas de inyección y una infraestructura de compresión.

También es importante señalar como criterios que influyen en la selección de los sistemas de levantamiento artificial, los mecanismos de producción del yacimiento entre los cuales están:

#### **2.7.18 Yacimientos con Empuje por Depleción**

La producción inicialmente sucede por el desplazamiento del petróleo y el gas en las cercanías del pozo por la expansión de los fluidos. No existe un acuífero ó inyección de fluidos que permitan la expansión de los mismos, teniendo como consecuencia una baja recuperación de crudo.

#### **2.7.19 Yacimientos con Empuje por Expansión de la Capa de Gas**

En un yacimiento en estado bifásico (capa de gas – petróleo), el desplazamiento de estos fluidos en la cercanía del pozo es el resultado de la expansión de la capa gas como consecuencia de la declinación de la presión del yacimiento. Es conveniente indicar que este tipo de yacimiento tiene gas libre (capa de gas), gas

disuelto en el petróleo (zona de petróleo) y petróleo, donde la recuperación puede estar influenciada por la combinación de la expansión de los fluidos, el desplazamiento de los mismos, el drenaje gravitacional o efectos capilares.

### **2.7.20 Yacimientos con Empuje Hidráulico**

El influjo de agua proveniente de un acuífero y/o la inyección de agua en pozos seleccionados, causa un desplazamiento de petróleo y gas en las cercanías del pozo. La recuperación se obtiene por drenaje gravitacional o por efectos capilares. El recobro por altas depleciones puede ser bajo desplazamiento natural de los fluidos y en especial bajo invasión de agua.

### **2.7.21 Yacimientos de Crudos Espumantes**

Corresponden aquellos yacimientos de crudos pesados que exhiben un comportamiento excelente de producción primaria con menor declinación de presión y menor relación Gas/Petróleo de producción que el obtenido por medio de un simulador empleando propiedades convencionales.

De los estudios realizados se tiene la hipótesis que en los crudos pesados y extra pesados en donde puede estar presente el fenómeno espumante, la espuma formada es del tipo viva, pues la misma proviene de la nucleación del gas en solución por efecto de la caída de presión. A simple vista estos crudos tienen una apariencia de una crema espesa y tiende a permanecer formando gran cantidad de burbujas de gas en el líquido en varias horas.

Los elevados porcentajes de recobro y de comportamiento anómalo de producción observado durante el agotamiento natural han sido los principales motivos para despertar el interés de la investigación en el yacimiento de estas características.

### **2.7.22 Presiones en el Yacimiento**

La diferencia entre la presión estática promedio del yacimiento y la presión fluyente en el fondo del pozo proveen la energía necesaria para levantar los fluidos del fondo del pozo.

Cuando la presión estática del yacimiento es lo suficientemente baja, que impide a ciertos métodos levantar los fluidos del pozo, se emplea el levantamiento artificial intermitente con cámara de acumulación, el cual permite mayor almacenamiento de líquido en el fondo del pozo.

Aunque los métodos de bombeo mecánico no dependen directamente de la presión estática de yacimiento, cuando este criterio disminuye la producción del pozo también se reduce.

Para los métodos de levantamiento por bombeo, la presión del pozo determina la capacidad de bombeo requerida y el tamaño de la bomba que se va a instalar, así como las condiciones de bombeo y los equipos de superficie, la ubicación y sumergencia óptima de la bomba de subsuelo.

### **2.7.23 Índice de Productividad**

Es un parámetro exclusivamente del pozo. En muy pocos pozos el índice de productividad (IP) pudiera permanecer constante por períodos considerables de tiempo, durante los cuales la tasa a fluctuado, este fenómeno obedece a que la tasa de producción ha variado en forma casuística, proporcionalmente al diferencial de presión ( $P_e - P_{wf}$ ). En pozos que producen con altas tasas de flujo, la proporcionalidad no se mantiene y el índice de productividad disminuye.

Los mecanismos de producción de los yacimientos afecta al índice de productividad, es decir, en yacimientos que producen por empuje hidráulico fuerte, el IP puede permanecer constantes para un rango amplio de variación de la tasa de flujo. Para otro tipo de empuje la linealidad es menos factible ya que el IP puede variar apreciablemente.

El IP con empuje por gas en solución y/o casquete de gas, la característica principal en su disminución en los pozos activos. A medida que la presión disminuye también disminuye la productividad. Esto se debe al aumento de viscosidad del petróleo, por efecto de la producción del gas en solución.

La disminución de IP se debe al deterioro de la permeabilidad por disminución de la saturación del petróleo e incremento en la saturación del gas. Es por ello que la

tasa máxima a que el pozo puede fluir depende del Índice de Productividad, de las condiciones existentes en el yacimiento y de la presión diferencial ( $P_e - P_{wf}$ ) disponible.

En cuanto a la manera de evaluarlo puede ser en función de la tasa de flujo y de la presión diferencial disponible, siempre y cuando se considere un comportamiento constante, por lo menos, durante un período de tiempo.

Cuando la presión de fondo fluyente ( $P_{wf}$ ) y/o la presión estática de fondo ( $P_e$ ) cae por debajo de la presión de burbujeo ( $P_b$ ) y se producen cambios radicales en las características del petróleo que causan curvaturas en el IP. Las causas principales que generan dichos cambios son las siguientes: Turbulencias a altas tasa de flujo, disminución en la permeabilidad relativa al petróleo, aumento de la viscosidad del petróleo crudo por pérdidas de gas en solución y reducción de la permeabilidad debido a la compresibilidad de la formación. Todos los cambios mencionados restringen la reducción líquida a medida que la  $P_{wf}$  disminuye.

En la explotación racional y eficiente de un yacimiento se puede postergar la caída del Índice de Productividad, con el espaciado óptimo de los pozos, uso óptimo de reductores (choques), conocimiento exacto de la geología del yacimiento y la actividad del pozo, dependiendo de su posición en la estructura de éste.

Se puede concluir que resulta más factible el incremento de producción de pozos que fluyan de yacimientos sub-saturados y/o con empuje de agua que en acumulaciones con presiones inferiores a la presión de burbujeo.

El efectivo conocimiento del IP de un pozo es de suma importancia para optimizar su producción, y en el caso de levantamiento artificial determinar si el diseño del equipo es adecuado.

## CAPÍTULO III

### 3.- MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Generalidades.

La metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el “cómo” se realizará el estudio para responder al problema planteado (Arias, 1999).

#### 3.2 Tipo y Diseño de la Investigación

Tomando en cuenta todas y cada una de las características del problema planteado, el tipo de investigación seleccionado, para proponer una metodología en el diseño de una familia coherente de criterios para la selección de los Sistemas de Levantamiento

Artificial, y de acuerdo con los objetivos, es la de una Investigación Documental Bibliográfica, Según (UPEL, 2008), “...El estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo principalmente, en fuentes bibliográficas y documentales” (p.6).

El objeto del diseño de Investigación, según (Sabino, 2002), “...Es el de proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar los hechos con la teoría y su forma es la de una estrategia o plan general que determine las operaciones necesarias para hacerlo”.

Es un estudio de campo porque se le administrará un cuestionario a especialistas en el área de ingeniería, específicamente a aquel personal entrenado en lo referente a Sistemas de Levantamiento Artificial y estudios de yacimientos, para complementar la información documental (Ob. Cit)

El diseño de campo es el nivel descriptivo debido a que en él “...se propone conocer grupos homogéneos de fenómenos utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura o comportamiento... Se ocupa sólo de

la descripción de los hechos a partir de un criterio o modelo teórico definido previamente”. (Sabino, 2002)

### **3.3 Población y Muestra**

La población de la presente investigación estará integrada por especialistas en el área de producción, específicamente por expertos involucrados en los procesos de estudios de sistemas de levantamiento artificial.

La población está conformada por cinco (5) expertos, considerados especialistas en sistemas de levantamiento artificial en las diferentes áreas de producción del país.

La muestra es la representación de la población. Para efecto de esta investigación, y de acuerdo a lo que plantea Sixto Hernández, en su Estadística Aplicada a la Educación, dice que: “...cuando un universo o población está conformada por 30 individuos o menos, este universo es igual a la población”.

### **3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Para obtener información, se utilizaron las siguientes técnicas:

Revisión bibliográfica: A través de la cual se aportó la documentación necesaria para el desarrollo del marco teórico. Por medio de la técnica bibliográfica, se realizó una revisión de la documentación pertinente al problema objeto de este estudio, se analizaron los diferentes Sistemas de Levantamiento Artificial, los modelos existentes que se utilizan en la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial y las técnicas para la generación de criterios

Los instrumentos utilizados en la revisión bibliográfica fueron la utilización de la ficha mixta, la cual, “...al hacer un resumen de un capítulo o párrafo de un texto encontramos ciertos inconveniente para resumir algunas ideas que en él se expresan y tenemos que copiarles textualmente” (Ballestrini, 2006).

El otro instrumento que se utilizó fue la ficha concepto. “...Este tipo de fichas permite transcribir una definición que elabora un autor de un determinado concepto”. (ob-cit).

Entrevistas: Se procedió a realizar una serie de entrevistas estructuradas que permitió obtener respuestas confiables sobre todo lo relacionado con el proceso de escogencia de criterios en la selección de Sistemas de Levantamiento Artificial. La técnica de entrevistas estructuradas constó de preguntas cerradas y abiertas lo cual permitió a los entrevistados dar la respuesta que a su juicio les parecía apropiada, pudiendo contestar por completo con sus propias palabras.

El instrumento de recolección de datos empleado para recoger la información necesaria es el cuestionario, el cual se diseñó para la obtención de datos primarios con preguntas abiertas "...llamadas también de final abierto" (Sabino, 2002, p. 129), las mismas proporcionaron una variedad más amplia de respuestas pues ellas podrán ser expresadas libremente por el entrevistado; y cerradas, "...o de alternativas fijas" (Sabino, 2002, p. 130). Estas formalizaron más el cuestionario, pues con ellas sólo se otorgó al entrevistado la posibilidad de escoger entre un número limitado de respuestas posibles.

El cuestionario está integrado por dieciocho (18) ítems con la finalidad de lograr los objetivos específicos trazados, por lo tanto cada pregunta tiene relación con cada uno de ellos. A continuación se muestra la tabla 3.1 que muestra la relación de las preguntas con los objetivos específicos.

Tabla 3.1: Relación de las preguntas del cuestionario con los objetivos específicos.

Pregunta No.	DESCRIPCIÓN	Objetivo Específico
1	¿Qué criterios influyen en la selección del Sistema de Bombeo Mecánico Convencional?	1
2	¿Qué criterios influyen en la selección del Sistema de Bombas de Cavidad Progresiva?	1
3	¿Qué criterios influyen en la selección del Sistema de Bombas Electrosumergibles?	1
4	¿Qué criterios influyen en la selección del Sistema de Bombas Hidráulicas?	1
5	¿Qué criterios influyen en la selección del Sistema de Levantamiento artificial por Gas?	1
6	¿Cuáles fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombeo Mecánico Convencional?	2
7	¿Cuáles fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombas de Cavidad Progresiva?	2
8	¿Cuáles fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombas Electrosumergibles?	2

Pregunta No.	DESCRIPCIÓN	Objetivo Especifico
9	¿Cuáles fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombas Hidráulicas?	2
10	¿Cuáles fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Levantamiento Artificial por Gas?	2
11	¿Qué debilidades tiene el uso del Sistema de Bombeo Mecánico Convencional?	2
12	¿Qué debilidades tiene el uso del Sistema de Bombas de Cavidad Progresiva?	2
13	¿Qué debilidades tiene el uso del Sistema de Bombas Electro-sumergibles?	2
14	¿Qué debilidades tiene el uso del Sistema de Bombas Hidráulicas?	2
15	¿Qué debilidades tiene el uso del Sistema de Levantamiento Artificial por Gas?	2
16	¿Es la Matriz de Evaluación Tecnológica una metodología apropiada para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial?	3
17	¿Es el Sistema Experto de Levantamiento Artificial una metodología apropiada para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial?	3
18	¿Es la Metodología de Selección Óptima de Levantamiento Artificial un procedimiento apropiado para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial?	3

### 3.5 Confiabilidad y Validez

La validez estará garantizada por cinco (5) especialistas, quienes una vez diseñado el instrumento, determinarán que el mismo, esté bien redactado y las preguntas sean claras y completas; además cumplirán con la finalidad de obtener información referente a los objetivos trazados en la investigación. Por otra parte, se realizará una prueba piloto a dos (2) personas con las mismas características de la muestra, con la finalidad de probar la claridad del contenido de las preguntas y de las respuestas para demostrar la alta confiabilidad del instrumento.

Según Valbuena (2001) la validez del cuestionario a través de los expertos es:

...Una técnica que consiste en someter a evaluación por parte de un conjunto calificado de personas (expertos) una serie de aspectos, elementos o etapas de un proyecto o programa de innovación a los fines de obtener su opinión acerca de la validez, relevancia, factibilidad, coherencia, tipo, deficiencias, etc. De los mismos

### 3.6 Técnicas de Análisis

Los resultados de los datos obtenidos en forma cuantitativa de los cuestionarios se analizarán y clasificarán con base en escalas de intervalos iguales mutuamente

excluyentes. Estos expondrán en forma de gráficos ilustrativos (círculos estadísticos) y los cualitativos se agruparán según la naturaleza de las respuestas.

### 3.7 Matriz Metodológica

Para la realización de este estudio fue necesario plantear los objetivos sobre los cuales se hicieron los análisis que contribuyeron a lograrlos. A tal efecto se elaboró una matriz metodológica, la cual señala las actividades realizadas así como las técnicas e instrumentos utilizados. (Ver tabla 3.2).

**Tabla 3.2:** Matriz metodológica.

Objetivos Específicos	Actividades Realizadas	Técnicas de Análisis Usadas
Diagnosticar la situación actual de los criterios para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial	<p>Se recopilaron datos sobre los criterios que afectan la selección de los sistemas de levantamiento</p> <p>Se realizaron tablas de observación sobre el comportamiento de los criterios para cada sistema de levantamiento</p> <p>Se realizaron entrevistas, con especialista en ingeniería de yacimientos y producción.</p> <p>Se redactaron conclusiones referentes al objetivo específico.</p>	<p>Fichas Bibliográficas.</p> <p>Tablas Comparativas.</p> <p>Cuestionarios de Preguntas Abiertas y Cerradas.</p>
Realizar un análisis matricial interno-externo de los sistemas de levantamiento artificial utilizados por la industria para tal fin y para la detección de su eficacia y su eficiencia.	<p>Se determinaron las fortalezas y las oportunidades, debilidades y amenazas que presentan los sistemas de levantamiento artificial más usados</p> <p>Se realizaron entrevistas con especialistas sistemas de levantamiento artificial.</p> <p>Se redactaron conclusiones referentes a los objetivos</p>	<p>Fichas Bibliográficas relativas al funcionamiento sistemas de levantamiento artificial</p> <p>Cuestionarios de preguntas abiertas y cerradas.</p>
Analizar los distintos modelos diseñados para la selección de los sistemas de levantamiento artificial.	<p>Se elaboraron fichas bibliográficas relativas a los modelos de selección.</p> <p>Cuestionarios de preguntas abiertas y cerradas</p> <p>Se redactaron las conclusiones referente a los objetivos específicos</p>	<p>Se elaboraron fichas bibliográficas relativas a los modelos de selección.</p> <p>Cuestionarios de preguntas abiertas y cerradas.</p>
Realizar un estudio sobre los distintos criterios que pueden afectar la selección de los sistemas de levantamiento artificial.	<p>Se elaboraron fichas bibliográficas relativas a los criterios que afectan la selección de los SLA..</p> <p>Cuestionarios con preguntas abiertas y cerradas</p>	<p>Se elaboraron fichas bibliográficas relativas a los criterios que afectan los SLA</p> <p>Cuestionarios con preguntas abiertas y cerradas</p>

## CAPITULO 4

### VENTANA DE MERCADO

Para obtener el máximo beneficio económico del yacimiento, es necesario seleccionar el método de producción óptimo, este es el que permite mantener los niveles de producción de la manera más económica posible.

En los yacimientos los fluidos están sujetos a la acción de varias fuerzas y energías naturales: fuerzas de presión, fuerzas de fricción por viscosidad, de gravedad de energía y fuerzas capilares, las cuales actúan en el movimiento de los fluidos hacia los pozos o para retenerlos en el yacimiento.

Cuando esas energías son suficientes para promover el desplazamiento de los fluidos desde su interior hasta el fondo del pozo y de allí a la superficie, se dice que "EL POZO FLUYE NATURALMENTE", es decir, el fluido se desplaza como consecuencia del diferencial de presión entre la formación y el pozo.

La mayoría de los pozos son capaces de producir por Flujo Natural en la primera etapa de su vida productiva, no obstante una vez finalizada la producción por Flujo Natural, es necesario seleccionar un Método de Levantamiento Artificial que permita seguir produciendo eficientemente el yacimiento.

El Método de Levantamiento Artificial consiste en extraer los fluidos del yacimiento mediante la aplicación de fuerzas o energías ajenas al pozo.

En Venezuela los Programas Masivos de Explotación Petrolera han ocasionado una disminución de las presiones de los yacimientos en los diferentes campos, esto trae como consecuencia el uso intensivo de los Sistemas de Levantamiento Artificial.

Hasta mediados de los años 1980 - 1990 los Sistemas de Levantamiento Artificial fueron: El Bombeo Mecánico Convencional para crudos pesados y El Levantamiento Artificial por Gas para crudos livianos y medianos. Fue hasta

finales de esta década que comienza la aplicación en el campo de métodos no convencionales como son los Sistemas de Bombas Electro-sumergibles, Bombas de Cavidad Progresiva y otros esfuerzos de Levantamiento Artificial por Gas, específicamente en la inyección intermitente con sus diversas modalidades.

Durante la última década del siglo pasado en Venezuela, el porcentaje de pozos produciendo bajo Sistemas de Levantamiento Artificial estuvo entre 87% hasta llegar al 96%, con un aporte del 78% de la producción total de petróleo (PDVSA, 2001).

Es indudable la importancia de los Sistemas de Levantamiento Artificial, por lo tanto, se hace imperante la necesidad de tomar decisiones cada vez más acertadas y en consecuencia una eficiente selección de los mismos adaptables a las necesidades de nuestros campos petroleros.

Los criterios que inciden en los Sistemas de Levantamiento Artificial son un número importante de variables las cuales deben ser analizadas, desglosadas, evaluadas y comparadas y donde muchos de ellos están vinculados con el área de Ingeniería de Producción, pero otros son altamente relevantes en el área de Ingeniería de Yacimientos. Para la optimización de la tasa de producción a través de los Sistemas de Levantamiento Artificial, se hace necesario la recopilación de toda la data existente pertinente a la perforación, completación y producción del pozo, así como también ciertas características del yacimiento.

El tipo de levantamiento requerido puede ser influenciado de acuerdo a la data recopilada, en consecuencia la selección de Sistema de Levantamiento Artificial puede ser determinada no por diseños óptimos sino por limitaciones físicas o criterios económicos. Es por ello que la Planificación en el Levantamiento Artificial, es fundamental desde la misma perforación del pozo.

La existencia de más de un Sistema de Levantamiento Artificial aplicable a cada pozo permite que puedan ser clasificados desde excelentes hasta pobres. Dependiendo sobre todo de las condiciones económicas, el Sistema de levantamiento seleccionado será el que satisfaga el mayor número de criterios.

La tendencia dominante en el sector petrolero en general, es la selección del Sistema de Levantamiento que mejor se adapte a cada pozo y que procure la menor inversión y los mínimos costos de producción para de esta forma pueda rendir el mayor beneficio, que en el contexto económico actual constituyen el marco de la presente investigación.

### **El producto**

La metodología propuesta permite identificar, entender y evaluar las partes que se refiere a la selección del Sistema de Levantamiento Artificial adecuado a condiciones de operación que se pueden calificar de normales, canaliza varias técnicas para coadyuvar a la eficiente selección de un SLA que resulte adecuado a un campo en particular, además, por su flexibilidad puede ser adaptada a otras situaciones más específicas, como pudiera ser el de los bitumines, previa consideración de sus particularidades.

La metodología una vez formulada y con ella realizar un programa de computación el cual integre todos los criterios y que automatice los cálculos y reporte las preferencias a que den lugar, permitirá una adecuada selección de los sistemas de levantamiento artificial *lo que* representaría un ahorro importante de tiempo, material humano y dinero.

### **El Mercado**

El mercado al cual va dirigido el producto son todas aquellas empresas petroleras tanto nacionales como extranjeras dedicadas a la explotación de petróleo crudo que requieran un instrumento de selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial de sencilla aplicación.

## **CAPÍTULO 5**

### **5.- DISEÑO, DESARROLLO, E IMPLANTACIÓN DEL PRODUCTO O SERVICIO**

#### **5.1- OBJETIVOS Y PROPÓSITOS DEL PROYECTO**

##### **5.1.1- Objetivos**

###### **5.1.1.1- General**

- Proponer el diseño de una Metodología en la determinación de una familia de criterios para la selección de Sistemas de Levantamiento Artificial

###### **5.1.1.2- Específicos.**

- Realizar un estudio sobre los distintos criterios que pueden afectar la selección de los sistemas de levantamiento artificial.
- Realizar un análisis matricial interno-externo de los sistemas de levantamiento artificial utilizados por la industria petrolera para tal fin y para la detección de su eficacia y su eficiencia.
- Analizar los distintos modelos diseñados para la selección de los sistemas de levantamiento artificial.
- Desarrollar la metodología

##### **5.1.2- Propósitos**

Aprovechar la indudable importancia que tienen de los Sistemas de Levantamiento Artificial, que hace imperante la necesidad de tomar decisiones cada vez más acertadas en la selección de estos sistemas y en consecuencia realizar una eficiente escogencia de los mismos que mejor se adapte a cada pozo, que procure la menor inversión y los mínimos costos de producción para de esta forma pueda rendir el mayor beneficio.

## **5.2- Descripción del Alcance**

En este trabajo se propone diseñar una metodología para agrupar las características incidentes en los principales criterios que influyen en la escogencia del Sistema de Levantamiento Artificial, la cual se apoya en dos fuentes principales: la literatura especializada y la experiencia de especialistas en el área. El problema de la selección se complica debido al hecho de que los criterios que influyen en un determinado Sistema de Levantamiento Artificial no necesariamente son los mismos que influyen en otro. Más aun en el caso de los criterios comunes a diversos métodos, su importancia relativa varía al pasar de un método a otro. El aporte principal de la metodología propuesta es que permite sistematizar el proceso de selección mediante una organización simple y racional de los criterios y de su importancia relativa, con el fin de que la selección coadyuve a una explotación adecuada.

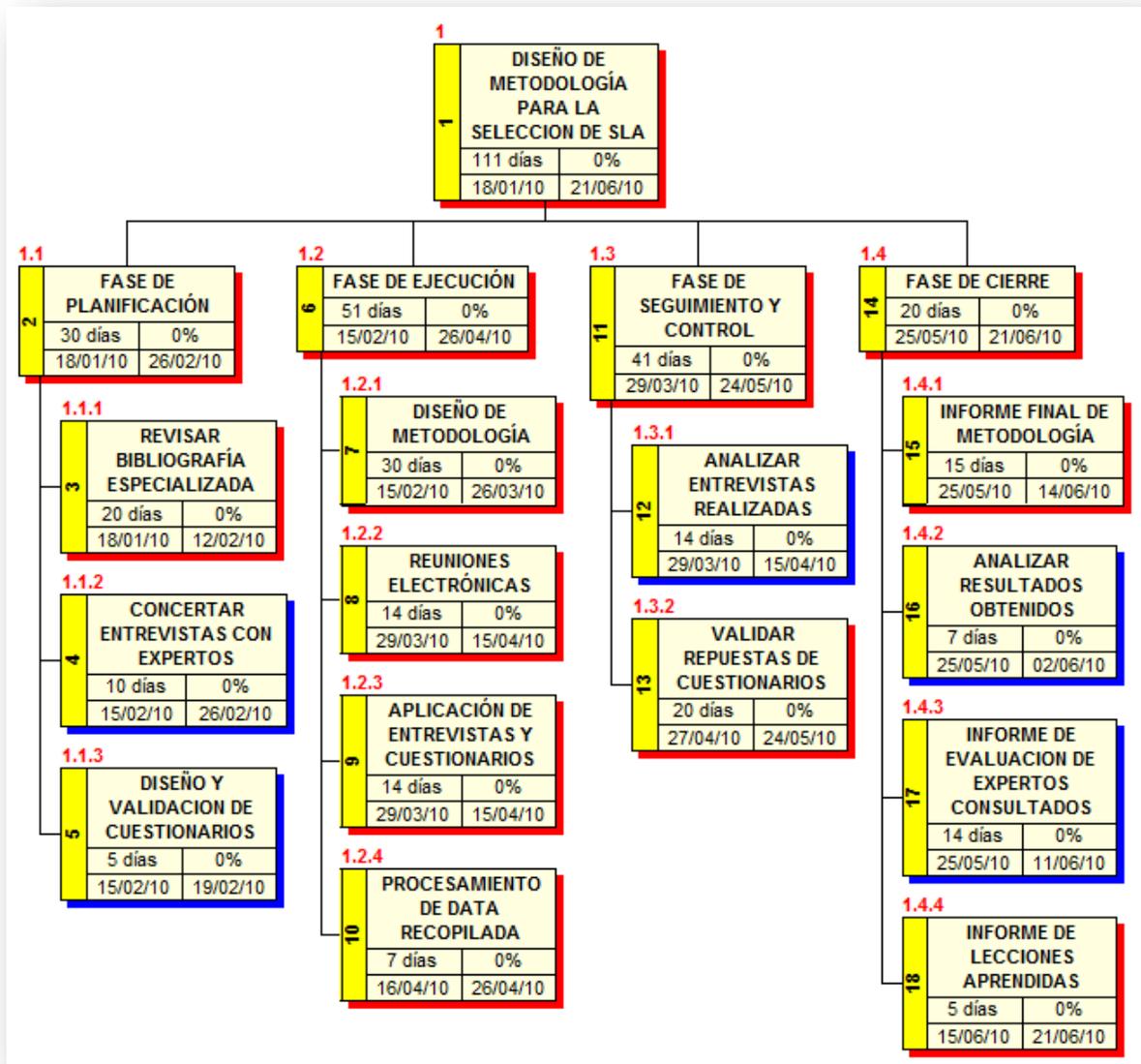
Los criterios que inciden en los Sistemas de Levantamiento Artificial están diseminados en un número importante de variables, repartidas en distintas áreas de la Ingeniería de Petróleo: perforación y completación, producción y yacimientos. Es bien conocido que, variables propias del yacimiento, la técnica de perforación utilizada y la forma como se maneja la producción influirán decisivamente en eficiencia del Sistema de Levantamiento Artificial seleccionado. Lo ideal es que la selección del Sistema de Levantamiento Artificial se realice a priori, como parte de la planificación, desde la misma perforación del pozo. Cuando la selección del Sistema de Levantamiento Artificial se hace a posteriori, se hace necesario la recopilación de la data pertinente a la perforación, completación y producción del pozo, así como ciertas características del yacimiento. La tendencia dominante en el sector petrolero es la selección del Sistema de Levantamiento Artificial que mejor se adapte a cada pozo y que procure la menor inversión y los mínimos costos de producción para lograr el mayor beneficio, sin embargo para el presente proyecto este se limitará al estudio

de los cinco Sistemas de Levantamiento Artificial de mayor uso, los cuales se listan a continuación

- Bombeo Mecánico
- Bombeo Electrosumergible
- Bombas de Cavidad Progresiva
- Bombeo Hidráulico
- Levantamiento Artificial por Gas

Además como las variables involucradas se circunscriben al área de la Ingeniería de Petróleo no se toma en cuenta los criterios de tipo económico y los de diseño del equipo, por lo cual la indicación que resultase para implementar un Sistema de Levantamiento Artificial determinado, será una primera aproximación al sistema que finalmente debe desplegarse.

### 5.3- Estructura Desagregada de Trabajo (EDT)



## **5.4- Entregables del Proyecto**

### **5.4.1 Fase Planificación:**

- Resumen de bibliografía especializada Consultada
- Cronogramas de entrevistas concertadas.
- Diseño y validación de Cuestionarios.

### **5.4.2 Fase Ejecución:**

- Metodología Diseñada
- Resultado de reuniones electrónicas
- Resultado de entrevistas y cuestionarios aplicados
- Resultados de la data procesada recopila

### **5.4.3 Fase de Seguimiento y Control:**

- Análisis de entrevistas realizadas
- Validación de respuestas de cuestionarios.

### **5.4.4 Fase de Cierre:**

- Informes final de la metodología.
- Análisis de los resultados obtenidos
- Informe de evaluación de expertos consultados
- Informe de Lecciones Aprendidas.

## **5.5- Estrategias Consideradas**

Luego de la revisión de la literatura existente, para la agregación de criterios mediante algunas de las técnicas mostradas anteriormente, tales como:

- Interacción
- Tormenta de Ideas
- Comités
- Método Sinéctico

- Grupo Nominal
- Método Delphi
- Método de Kawakita Jiro
- Árbol de Decisiones
- Reuniones Electrónicas
- Diagramas Causa-Efecto

o cualquier otra conocida por el coordinador.

Y para facilitar la decisión, sobre que metodología se debe emplear, se amplió la tabla desarrollada inicialmente por la General Electric en 1996 y mostrada en la tabla 5.1. En dicha tabla se listan ciertos criterios de eficiencia de los métodos analizados, tales como:

- Numero de ideas que se generan,
- Calidad de las ideas generadas,
- Presión que ejerce sobre el grupo decisor,
- Costo de implantar dicho método,
- Velocidad de implantación,
- Grado de orientación hacia las tareas,
- Posibilidad de generar conflictos interpersonales dentro del grupo de decisión,
- Sensación de logro que se alcanza,
- Grado de compromiso que adquiere el grupo con los criterios planteados y Aumento de la cohesión del grupo decisor.

**TABLA 5.1: COMPARACIONES ENTRE LOS DIFERENTES MODELOS DE TOMAS DE DECISIONES**

<b>Criterios de Eficacia</b>	<b>Interacción</b>	<b>Tormenta de Ideas</b>	<b>Comités</b>	<b>Sinéctico</b>	<b>Electrónica</b>	<b>Nominal</b>	<b>Delphi</b>	<b>K-J</b>	<b>Árbol de Decisiones</b>
<b>Numero de Ideas</b>	Baja	Moderada	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
<b>Calidad de las Ideas</b>	Baja	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada	Alta
<b>Presión Social</b>	Alta	Baja	Alta	Alta	Baja	Moderada	Baja	Baja	Baja
<b>Costo</b>	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
<b>Velocidad</b>	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Baja	Baja	Baja
<b>Orientación a la Tarea</b>	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Alta
<b>Potencial de conflicto interpersonal</b>	Alta	Baja	Alta	Alta	Baja	Moderada	Baja	Baja	Moderada
<b>Sentimientos de realización</b>	Alto	Alto	Moderado	Alto	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Alto
<b>Compromiso con la solución</b>	Alto	No aplica	Bajo	Alto	Moderado	Moderado	Bajo	Moderado	Alto
<b>Desarrolla la cohesión del grupo</b>	Alta	Alta	Moderada	Alta	Baja	Moderada	Baja	Moderada	Alta

Fuente: Robbins (1996)

Con respecto a la Jerarquización de los criterios existentes, algunos de los mecanismos mencionados o descritos en la parte teórica del presente trabajo, ayudan a esta finalidad:

- Clasificación Según el orden de Importancia,
- Clasificación Según la Clasificación de los Criterios,
- Clasificación por Medio de la Asignación de Pesos Relativos,
- Clasificación por su Prioridad,
- Clasificación Según Asignación previa,
- Método de Comparaciones Pareadas,
- Método de Normalización,
- Proceso Analítico Jerárquico

Donde el Proceso Analítico Jerárquico se describe en detallada por ser el mejor mecanismo para jerarquizar los criterios, sin embargo, se elaboró la tabla 5.2 que permite determinar la metodología que más se adapte para la determinación de criterios, y en el cual se pregunta si dicha metodología al jerarquizar determina pesos de los criterios planteados, luego utiliza algunos criterios para el análisis, entre los cuales se tienen:

- ¿La metodología determina pesos?
- Grado de subjetivismo.
- Grado de confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Grado de intercambio entre el coordinador y la unidad de decisión.
- Grado de dificultad en la aplicación de la metodología.
- Costos de implementación.
- Tiempo requerido de implementación.
- Requerimientos computacionales necesarios.
- Requerimientos matemáticos.

**TABLA 5.2:** COMPARACIONES ENTRE LOS DIFERENTES MÉTODOS PARA LA JERARQUIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE PESOS

<b>Criterios de Eficacia</b>	<b>Orden de Importancia</b>	<b>Clasificación de Criterios</b>	<b>Asignación Pesos Relativos</b>	<b>Según su Prioridad</b>	<b>Asignación Previa</b>	<b>Comparaciones pareadas</b>	<b>Normalización</b>	<b>Proceso Analítico Jerárquico</b>
<b>¿La metodología determina pesos?</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>
<b>Grado de subjetivismo</b>	<b>ALTO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>
<b>Grado de confiabilidad</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>
<b>Grado de intercambio entre el asesor y la unidad de decisión</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>
<b>Grado de dificultad en la aplicación de la metodología</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>ALTO</b>
<b>Costo de implementación</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>
<b>Tiempo requerido de implementación</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>
<b>Requerimientos computacionales</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>BAJO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>
<b>Requerimientos Matemáticos</b>	<b>BAJO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>BAJO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>NINGUNO</b>	<b>BAJO</b>	<b>MODERADO</b>	<b>MODERADO</b>

Fuente: Carvajal (1999)

## 5.6- Recomendaciones

Para la agregación de criterios de todos los procedimientos descritos para tal fin se recomienda utilizar el modelo de reuniones electrónicas debido a la imposibilidad de reunir a todos los expertos que colaboraran en este proceso además por ser un método que genera un gran número de ideas con mucha rapidez y muy bajo potencial de conflicto entre los participantes.

Con respecto a la estructuración de los criterios en lo que respecta a la jerarquización y ponderación de los mismos la metodología se recomienda aplicar el Proceso Analítico Jerárquico ya que es el método que mejor garantiza el cumplimiento de los objetivos del proyecto. También se recomienda elaborar y aplicar varios cuestionarios individuales a los especialistas consultados de modo de complementar y registrar la información recabada y así realizar las auditorías pertinentes a sus respuestas y poder comprobar su consistencia

## 5.7- Análisis de Riesgos (Matriz Simplificada)

No.	Descripción del Riesgo	Nivel de Impacto	Probabilidad de Ocurrencia	Respuesta al Riesgo
1	El número de interacciones requeridas para la generación de la matriz de comparaciones puede llegar a ser considerablemente alto en función del número de atributos o variables y niveles jerárquicos considerados	<b>Alto</b> , con el consecuente cansancio de la unidad de decisión, que imposibilita la obtención de resultados óptimos	<b>Alta</b> , debido al gran número de variables generadas y complejidad del problema	Realizar varias sesiones de reuniones y entrevistas
2	Encontrar variables a ser evaluadas que no son de la misma naturaleza	<b>Intermedio</b> , ya que dificulta la diferenciación con otras variables, incrementado el tiempo de estudio	<b>Bajo</b> , debido a la naturaleza del estudio	Efectuar técnicas de agrupación de manera que las comparaciones se efectúen dentro de los grupos así formados
3	Incapacidad del método para mantener el orden de preferencias	<b>Alto</b> , incrementa el tiempo de estudio	<b>Bajo</b> ,	Seleccionar otro método que pueda mantener un orden de preferencias
4	Imposibilidad de sostener el supuesto de independencia que involucra la jerarquía lineal.	<b>Intermedio</b> , dificulta la determinación de las preferencias del método	<b>Medio</b> , dependerá de la consistencia de las respuestas de los expertos	Realizar auditorías de las respuestas obtenida y en caso tal reformular la ecuación a una se segundo grado u otra polinómica
5	Poca disposición a participar y honestidad intelectual por parte de los expertos consultados	<b>Alto</b> , influye negativamente en la calidad de los resultados	<b>Bajo</b> , por la trayectoria de los expertos seleccionados	Selección de especialistas de comprobada capacidad y honestidad

## **5.8- Guías para el Control del Proyecto**

Para el control de la correcta ejecución del proyecto se recomienda:

- Verificar la consistencia de las respuestas de los expertos consultados
- Comprobar la consistencia de los resultados obtenidos
- Verificar la transitividad de los juicios emitidos por los expertos
- Comprobar la independencia de los criterios seleccionados

## **5.9- Estrategia de Ejecución**

### **5.9.1 Constitución de un equipo de trabajo**

Una vez que se decide emprender el estudio, se selecciona el grupo de trabajo. Este grupo de agentes activos debe estar constituido por personas que posean experiencia en el uso y selección de Sistemas de Levantamiento Artificial (SLA). Su disposición a participar su honestidad intelectual son requisitos indispensables. Este paso es crucial pues determina el éxito de la labor emprendida.

### **5.9.2 Generación de criterios**

La determinación de los criterios va a depender de dos principios fundamentales: la determinación de las posibles consecuencias de cada alternativa y, la preferencia del grupo de expertos consultados sobre esas consecuencias. El punto de partida para especificar criterios es la creación de una lista no estructurada de posibles consecuencias surgidas de la generación de ideas que inicialmente, los expertos involucrados consideran pertinentes; en otras palabras es un acto creativo basado en la experiencia.

Este enfoque lo formaliza (Keeney [1976]) para un caso general de decisión identificando entre las técnicas para reconocer criterios indicadas en el Capítulo 2, en las cuales existen redundancia expresada a propósito: es más fácil reorganizar criterios redundantes cuando están listados que identificar criterios ausentes.

En consecuencia, la determinación de criterios viene condicionada por: Las preferencias involucradas, el aprendizaje que se desarrolla en el proceso de decisión, el impacto de dichos criterios sobre los grupos involucrados directa o indirectamente en la toma de decisión.

Por otra parte, esta determinación de criterios puede verse empobrecida por: El conformismo, la pasividad o la ligereza por parte del coordinador y del grupo de expertos, el pensamiento one-way o la existencia de paradigmas preestablecidos que imposibiliten el observar otras posibles alternativas, el temor de hacer el ridículo o de ir en contra del status quo.

### 5.9.3 Construcción de una jerarquía

Tiene como finalidad representar las interacciones funcionales de sus componentes y sus impactos en el sistema entero. Es también una forma conveniente de descomponer un problema complejo, en la búsqueda de relaciones causa-efecto o bien concurrentes, en pasos o niveles que forman una cadena lineal. Una jerarquía lineal puede interpretarse como un esquema de derivación de consecuencias carente de retroalimentaciones, lo cual implica un modelo aditivo ponderado que supone el cumplimiento de una premisa de independencia de las preferencias y de los atributos seleccionados que deberán ser consideradas.



Figura 5-1: Representación de una jerarquía típica.

Ponderación de los criterios: Una de las técnicas multicriterio que permite establecer la importancia relativa de los criterios agrupados en una jerarquía lineal concurrente es el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) de Saaty descrito en el Capítulo 2. Muy sucintamente, el PAJ es una teoría de medición aplicada a la toma de decisiones multicriterio que, partiendo de una jerarquía lineal, utiliza comparaciones pareadas de criterios ubicados en un determinado nivel de la jerarquía para determinar la importancia de un criterio en el nivel donde se ubica. A su vez, la agrupación jerárquica permite determinar el aporte en importancia de un nivel inferior en uno superior, lográndose al final una agregación que culmina en el objetivo focal del proceso, que corona la jerarquía. El basamento matemático es relativamente simple, pues se sustenta esencialmente en los conceptos algebraicos de auto-vector y auto-valor de una matriz, sin embargo, sostener el supuesto de independencia que involucra la jerarquía lineal no siempre es sencillo.

#### **5.9.4 Construcción de los modelos de preferencias**

La expresión de las preferencias de un agente activo del proceso de decisión de cara a las consecuencias de una variable, constituye un modelo de preferencia. Este modelo expresa cuantitativamente el grado de satisfacción (o de insatisfacción) que produce el valor de la consecuencia percibida a lo largo de los posibles valores de las variables. Por no disponer de información directa sobre la influencia de una variable en un determinado SLA, se hace necesario construir un modelo que indique la adecuación de un determinado valor de la dicha variable al SLA analizado. Para ello se adaptaron las curvas de valoración descritas en el Capítulo 2, las cuales brevemente, es un modelo de preferencia que se construye mediante comparaciones pareadas de un valor de la variable con otro valor considerado ideal, el cual se supone que arroja una preferencia máxima.

##### **5.9.4.1 Determinación de las preferencias sobre un SLA**

Para determinar cuál SLA es el más adecuado de acuerdo a los criterios previamente seleccionados, jerarquizados y para los cuales fue determinada una

forma funcional que describe las preferencias de los especialistas, se debe diseñar una ecuación donde queden plasmados todos los criterios. En este trabajo se plantea implementar, de acuerdo a la información obtenida, un modelo lineal como sigue:

$$Im_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} f_{ij}(x)$$

donde:

$Im_i$  : Calificación del SLA i

$m_i$  : SLA i en estudio

$j$  : Criterio a evaluar

$n$  : Número de criterios en el sistema i

$w_{ij}$  : Peso relativo del criterio j para el SLA i

$f_{ij}(x)$ : Valoración del criterio

### **5.10 Planes Detallados de Ejecución (PEP)**

A fin de escoger los criterios que más influyen en la selección de un SLA, la metodología propuesta aporta a la unidad de decisión de una técnica donde sea cual fuese la situación a enfrentar, dispongan de una secuencia lógica de pasos que le permitan lograr su objetivo. La metodología desarrollada sigue en su fase inicial el Circulo de Decisión planteado por Baker (2007), el cual busca, una vez conocido el problema, generar una lista de posibles alternativas, explorar los pro y contra de cada una de ellas y eliminar las alternativas no relevantes. Es un proceso cíclico que conlleva a la generación de nuevas alternativas.

Sin embargo no basta con identificar criterios. ‘estos pueden obedecer a una clasificación y tener una estructura. Por ello la metodología consta de en cuatro etapas: 1.-Definición del Problema, 2.-Generación de Lista de Criterios, 3.-Descarte de Criterios, 4.-Estructuración de Criterios.

### 5.10.1 Definición del problema

Aquí se plantea el problema y se especifica lo que se quiere, se asegura de que este se entendió y de ser así se pasa a la siguiente etapa, la figura 5-2 representa gráficamente esta etapa de la metodología mediante un diagrama de flujo.

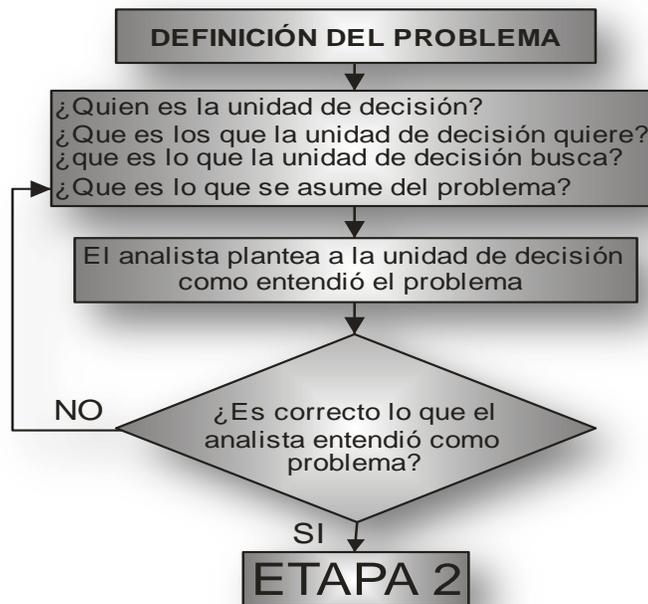


Figura 5-2: Etapa 1; Definición del problema. Carvajal (1999)

### 5.10.2 Generación de lista de criterios

Lo importante es generar una lista de criterios sin jerarquías ni relaciones entre ellos, esta etapa es creativa por excelencia, por lo tanto no se detallan mecanismos específicos a seguir. Para ello en primer lugar el coordinador acude a las fuentes bibliográficas y aplica lo recomendado por Keeney [1976]. Con ello se busca encontrar problemas similares al planteado. Si el problema es similar, puede que contenga criterios que puedan ser añadidos a la lista a desarrollar. Los criterios similares pueden ser trasladados directamente o ser modificados o adaptados. Luego se procede a la agrupación de criterios mediante algunas de las técnicas existentes para tal fin, tales como: Interacción, Tormenta de ideas, Comités, Método Sinéctico, Grupo Nominal, Método Delphi, Método de Kawakita

Jiro, Árbol de Decisiones, Reuniones Electrónicas, Diagramas Causa-Efecto, entre otras. La idea es que permitan la interacción con y entre los especialistas. En este caso el coordinador, considerando las características del problema y del grupo, así como los recursos disponibles, define el tipo de mecanismo a seguir. Todas las ideas generadas son añadidas a la lista. El coordinador centra la discusión sobre un modelo, así los especialistas se ven en la necesidad de pensar en función de lo que desea y en lo que dispone para alcanzar ese objetivo. La Figura 5-4 detalla esta la etapa

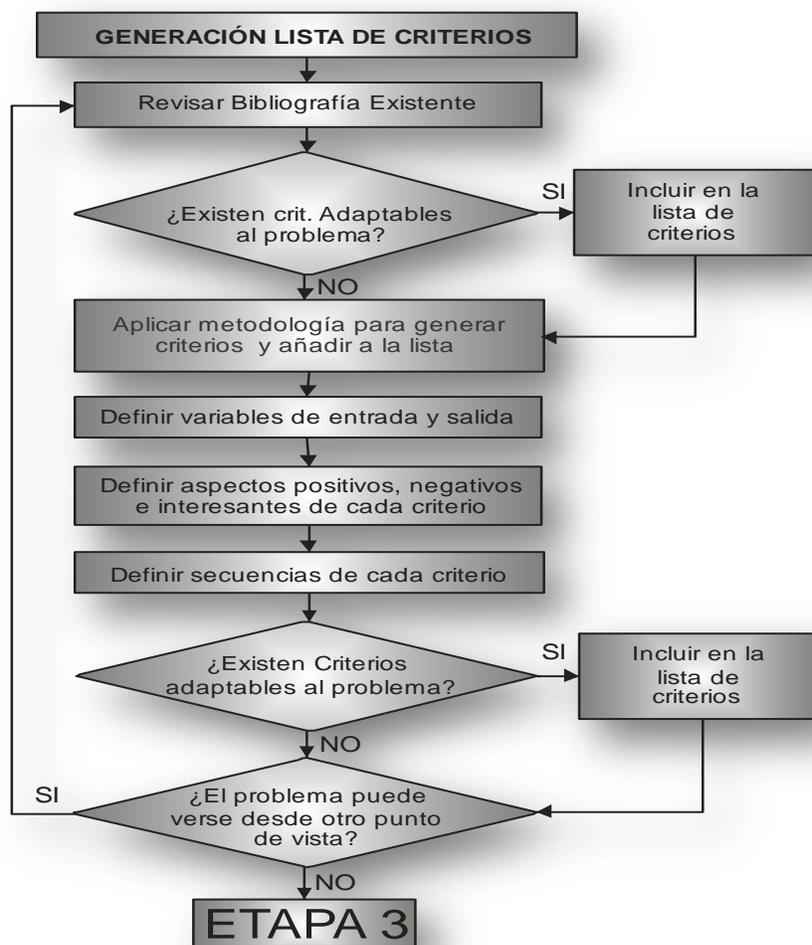


Figura 5-4: Generación de la lista de criterios. Carvajal (1999)

Posteriormente el coordinador plantea la necesidad de definir los aspectos positivos, negativos e interesantes de los criterios generados. Los positivos indican lo que hace el criterio atractivo y los beneficios extras que aporta. Los aspectos negativos señalarían deficiencias, defectos, riesgos y peligros que le están asociados. Los aspectos interesantes revelan implicaciones, consecuencias. Efectos en otros sistemas o personas sobre el criterio estudiado, Con ello, se logra centrar al grupo hacia qué resultados esperaría y cuáles no, lo cual podría dar nuevas pistas sobre criterios no considerados anteriormente, por olvido o por no ser considerados relevantes para el análisis. Esta etapa depende en gran medida de la interacción entre los especialistas y de su actitud hacia la consecución de criterios claros y relevantes.

### **5.10.3 Descarte de Criterios:**

En esta etapa se depura la información generada. La eliminación de una alternativa posible depende del avalúo de la opción según los criterios establecidos y de las consecuencias de su posible implantación. Cuando evalúan las opciones va a depender del tiempo disponible para el análisis y del avalúo del coordinador y del grupo de especialistas basado muchas veces en su intuición de cuales alternativas le son más atractivas. También se establece que se debe cuidar que cada criterio no se encuentre redundante, que eventualmente puedan ser descompuestos y/o simplificados, y por ultimo deben ser mínimos de tal forma que la dimensión del problema sea lo más pequeña posible.

A continuación, los participantes se preguntan sobre lo bueno y lo malo de cada criterio, buscando descartar aquellos criterios de aporte mínimo. Este paso se acelera pues hubo un análisis previo en la etapa 2, donde se determinaron estos aspectos. Se debe considerar los recursos disponibles y el esfuerzo a emplear para la selección del criterio analizado. Se recomienda aplicar una variante del test de importancia de Ellis (citado en Keeney/Raiffa [1976]), se propone su uso ya que eliminaría criterios. Aunque únicos, son poco trascendentes o cuyo aporte a la solución final será mínimo. En este caso aplicaría cuando, el coordinador

pregunta ¿qué pasa si elimino este criterio?, si el problema pierde esencia por la inexistencia de dicho criterio el mismo debe ser incluido de lo contrario se descarta de la lista de criterios (Figura 5-6).

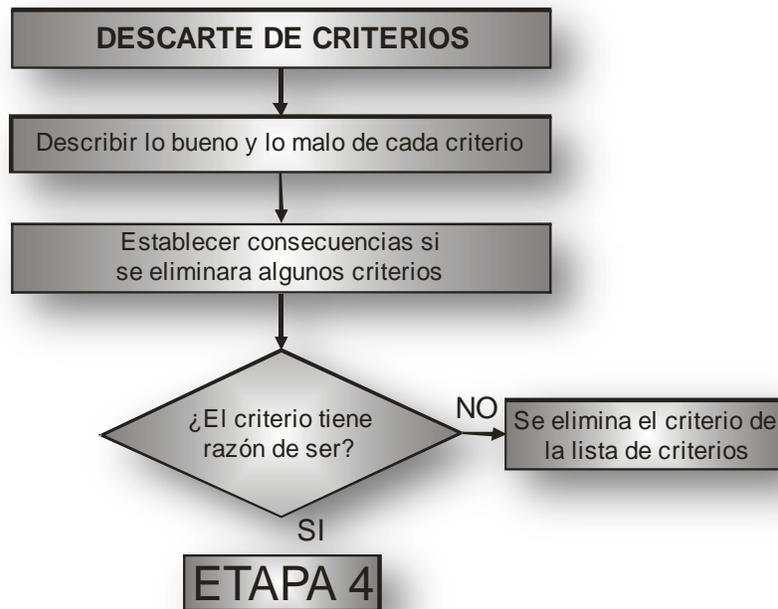


Figura 5-6: Descarte de criterios. Carvajal (1999)

#### 5.10.4 Estructuración de criterios

Esta última etapa incluye la jerarquización, ponderación y determinación de las curvas de preferencias para los criterios pertinentes a cada SLA. Los primeros dos procesos, pueden ser separados o simultáneos, dependiendo del camino escogido, para ello en este trabajo se utiliza el PAJ. Luego se procede a la determinación de las preferencias mediante las curvas de valoración y la revisión de los criterios a la luz del problema planteado.

Se efectúa una revisión general entre el coordinador y los expertos, sobre los criterios determinados y su estructuración, con el objeto de determinar si dichos criterios planteados se adecuan a satisfacción con el problema propuesto. Si la respuesta es afirmativa se culmina con el proceso de determinación de criterios.

Si por el contrario la respuesta es negativa, esto indicaría una desviación importante con respecto al propósito inicial, por lo cual se retrocede a la Etapa 1, para revisar nuevamente lo que se planteó inicialmente como problema y más importante que entendió el coordinador de lo que se requería. Es importante señalar que un volver atrás a la etapa inicial, en ningún momento implica comenzar de nuevo, siempre se estará un paso adelante, ya que se habrá creado una relación con el grupo de expertos y un conocimiento mayor de los criterios a determinar. La Figura 5-7 ilustra esta etapa.



Figura 5-7: Etapa 4: Estructuración de Criterios. Carvajal (1999)

La figura 5-8 muestra la metodología completa en todas sus etapas:

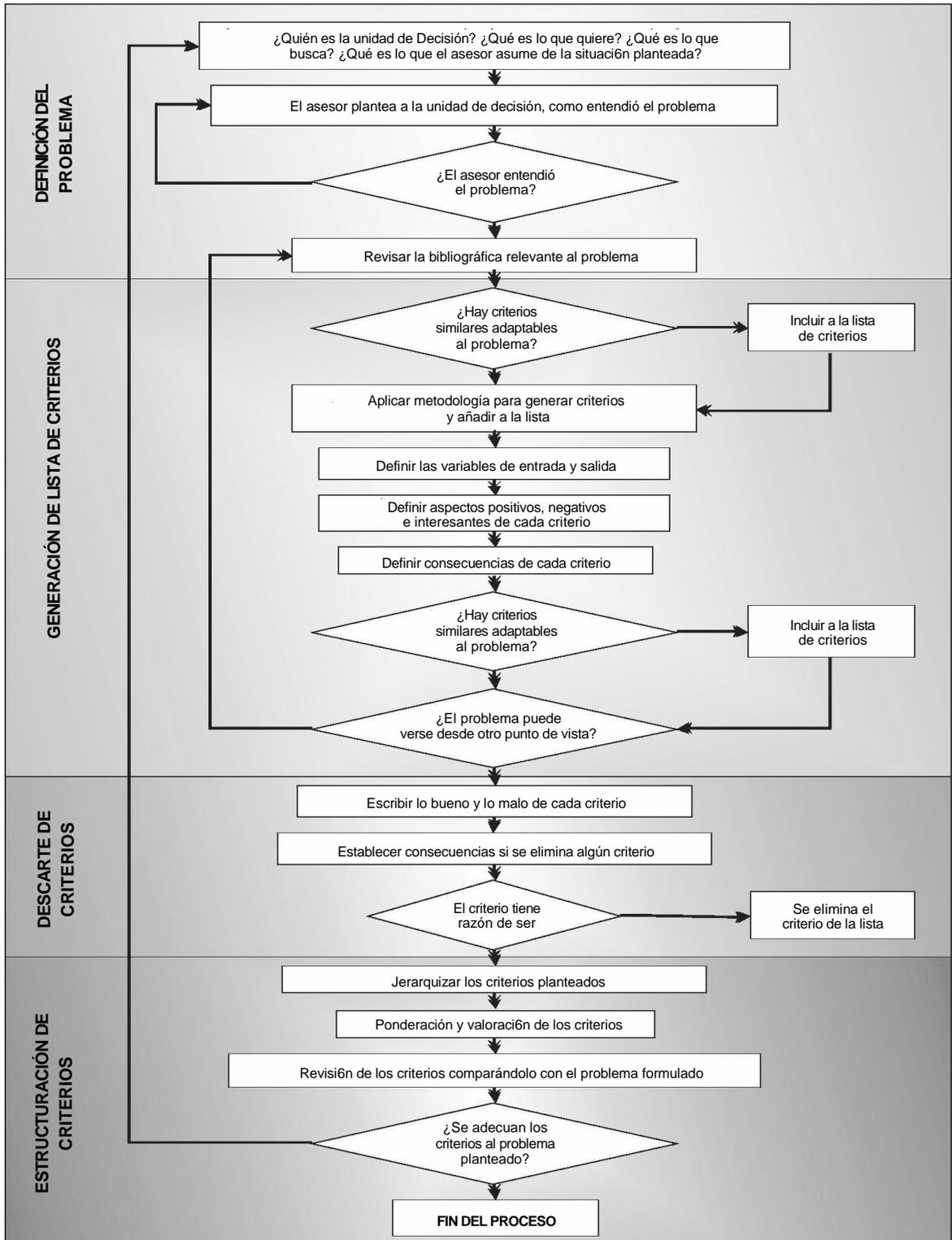
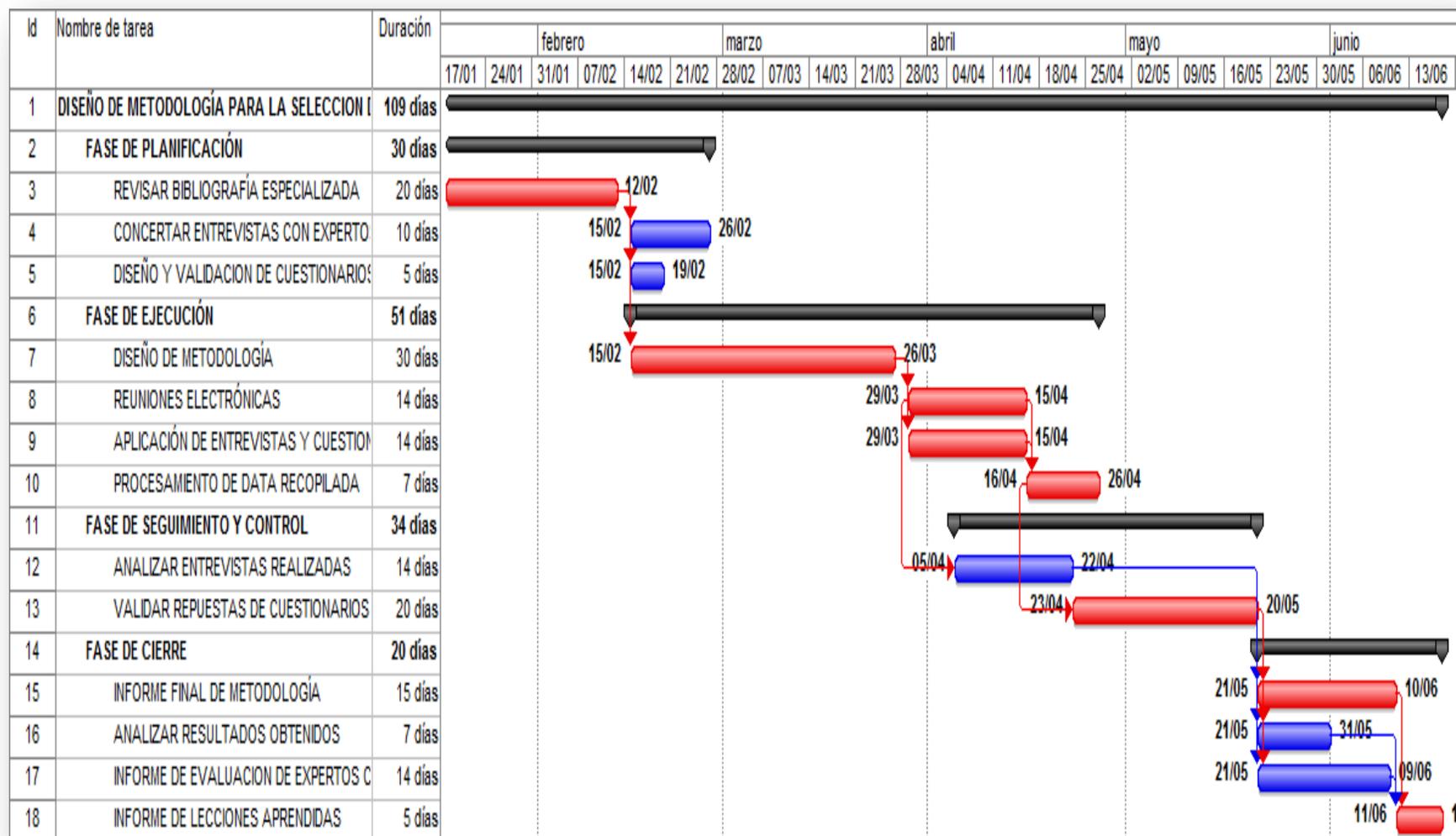


Figura 5-8: Metodología para Selección de Criterios

## 5.11 Cronograma detallado del plan ejecución del proyecto



## CAPITULO 6

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Siguiendo la metodología establecida se elaboró una lista con los criterios que influyen en la Selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial para alcanzar la resolución del problema planteado. Se generaron 64 criterios sin jerarquías ni relaciones entre ellos lograda a partir de la información obtenida de la bibliografía revisada y a la consulta de diversos especialistas con suficiente experiencia de campo entre los cuales se destacan expertos de distintas empresas petroleras, y reconocidos profesores de la UCV con amplia experiencia en la industria.

En la etapa de descarte se procedió a depurar los datos obtenidos en la etapa anterior, para ello se eliminaron los criterios que eran redundantes o que poseían poca importancia y aquellos que complicaban excesivamente el contenido del problema como los criterios de carácter económico y los de diseño del equipo, ya que las dimensiones del problema deben ser lo más pequeña posible de modo de que el análisis sea más eficiente y óptimo además de simplificar el trabajo de los especialistas al mínimo posible ya que la disponibilidad de su tiempo en la mayoría de los caso es escasa, quedando de esta forma 19 criterios que serán analizados y que se listan a continuación.

**TABLA 6.1- CRITERIOS ANALIZADOS**

1	Índice de Productividad	11	Mecanismos de Producción
2	Tasa de Líquido	12	Pericia en el Método
3	Corte de Agua	13	Diámetro del Revestidor
4	Relación Gas Líquido	14	Diámetro del Eductor
5	Comportamiento de Afluencia	15	Tipo de Completación
6	Profundidad de Asentamiento de la Bomba	16	Grado de Desviación del Pozo
7	Presión Estática del Yacimiento	17	Producción de Parafinas y Asfáltenos
8	Gravedad API	18	Acumulación de Escamas
9	Temperatura en el fondo	19	Problemas de Corrosión
10	Problemas de Arenamiento		

En esta etapa se complemento la información conseguida con la elaboración de varios cuestionarios donde se discutieron los criterios que influyen para cada Método de Levantamiento además de analizar las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos con el fin de complementar la información obtenida de la bibliografía pero esta vez basada en la experiencia de campo de los distintos especialistas (ver Apéndice I)

Pregunta 1.

Al consultarle a la muestra ¿Qué criterios influyen en la selección del **Sistema de Bombeo Mecánico?**, esta respondió de la siguiente manera:

CRITERIOS	SI	%	NO	%
Índice de Productividad	3	75	1	25
Tasa de Líquido	2	50	2	50
Corte de agua	1	25	3	75
Relación Gas Líquido	4	100	0	0
Comportamiento de Afluencia	3	75	1	25
Profundidad al tope de las Perf.	3	75	1	25
Presión Estática	2	50	2	50
Gravedad API	2	50	2	52
Temperatura en el fondo	1	25	3	75
Problemas de Arenamiento	4	100	0	0
Mecanismos de Producción	1	25	3	75
Localización del Pozo	1	25	3	75
Fuente de Energía Disponible	2	50	2	50
Plataforma de Producción	2	50	2	50
Pericia en el Método	1	25	3	75
Diámetro del Revestidor	3	75	1	25
Diámetro del Eductor	4	100	0	0
Tipo de Completación	1	25	3	75
Grado de Desviación	4	100	0	0
Prod. De Parafinas y Asfáltenos	4	100	0	0
Acumulación de Escamas	2	50	2	50
Problemas de Corrosión	3	100	0	0

La muestra entrevistada señaló que los **Criterios** que más influyen en la selección de los Sistemas de Bombeo Mecánico son los siguientes:

1	Índice de Productividad	8	Problemas de Arenamiento
2	Tasa de Líquido	9	Diámetro Revestidor
3	Relación Gas Líquido	10	Diámetro del Eductor
4	Comportamiento de Afluencia	11	Grado de Desviación
5	Profundidad	12	Producción de Parafinas
6	Presión Estática	13	Acumulación de Escamas
7	Gravedad API	14	Problemas de Corrosión

Al consultarle a la muestra ¿Qué criterios influyen en la selección del **Sistema de Bombeo Electrosumergible?**, esta respondió de la siguiente manera

<b>CRITERIOS</b>	<b>SI</b>	<b>%</b>	<b>NO</b>	<b>%</b>
Índice de Productividad	4	100	0	0
Tasa de Líquido	3	75	1	25
Corte de agua	1	25	3	75
Relación Gas Líquido	4	100	0	0
Comportamiento de Afluencia	4	100	0	0
Profundidad al tope de las Perf.	3	75	1	25
Presión Estática	3	75	1	25
Gravedad API	3	75	1	25
Temperatura en el fondo	4	100	0	0
Problemas de Arenamiento	3	75	1	25
Mecanismos de Producción	1	25	3	75
Localización del Pozo	1	25	3	75
Fuente de Energía Disponible	4	100	0	0
Plataforma de Producción	2	50	2	50
Pericia en el Método	3	75	1	25
Diámetro del Revestidor	4	100	0	0
Diámetro del Eductor	2	50	2	50
Tipo de Completación	1	25	3	75
Grado de Desviación	2	50	2	50
Prod. De Parafinas y Asfáltenos	4	100	0	0
Acumulación de Escamas	3	75	1	25
Problemas de Corrosión	4	100	0	0

Lo anterior indica que la muestra entrevistada señaló que los criterios que más influyen en la selección de los Sistemas de Bombeo Electrosumergible son:

<b>1</b>	<b>Índice de Productividad</b>	<b>10</b>	<b>Fuente de Energía Disponible</b>
<b>2</b>	<b>Tasa de Líquido</b>	<b>11</b>	<b>Plataforma de Producción</b>
<b>3</b>	<b>Relación Gas Líquido</b>	<b>12</b>	<b>Pericia en el Método</b>
<b>4</b>	<b>Comportamiento de Afluencia</b>	<b>13</b>	<b>Diámetro Revestidor</b>
<b>5</b>	<b>Profundidad</b>	<b>14</b>	<b>Diámetro del Eductor</b>
<b>6</b>	<b>Presión Estática</b>	<b>15</b>	<b>Grado de Desviación</b>
<b>7</b>	<b>Gravedad API</b>	<b>16</b>	<b>Producción de Parafinas</b>
<b>8</b>	<b>Temperatura</b>	<b>17</b>	<b>Acumulación de Escamas</b>
<b>9</b>	<b>Problemas de Arenamiento</b>	<b>18</b>	<b>Problemas de Corrosión</b>

Al consultarle a la muestra ¿Qué criterios influyen en la selección del **Sistema de Bombas de Cavidad Progresiva?**, esta respondió de la siguiente manera

CRITERIOS	SI	%	NO	%
Índice de Productividad	3	75	1	25
Tasa de Líquido	2	50	2	50
Corte de agua	1	25	3	75
Relación Gas Líquido	4	100	0	0
Comportamiento de Afluencia	3	75	1	25
Profundidad al tope de las Perf.	3	75	1	25
Presión Estática	3	75	1	25
Gravedad API	4	100	0	0
Temperatura en el fondo	4	100	0	0
Problemas de Arenamiento	4	100	0	0
Mecanismos de Producción	1	25	3	75
Localización del Pozo	1	25	3	75
Fuente de Energía Disponible	3	75	1	25
Plataforma de Producción	3	75	1	25
Pericia en el Método	2	50	2	50
Diámetro del Revestidor	4	100	0	0
Diámetro del Eductor	4	100	0	0
Tipo de Completación	1	25	3	75
Grado de Desviación	4	100	0	0
Prod. De Parafinas y Asfáltenos	3	100	0	0
Acumulación de Escamas	2	50	2	50
Problemas de Corrosión	4	100	0	0

Lo anterior indica que la muestra entrevistada señaló que los criterios que más influyen en la selección de los Sistemas de Bombas de Cavidad Progresiva son:

<b>1</b>	<b>Índice de Productividad</b>	<b>10</b>	<b>Fuente de Energía Disponible</b>
<b>2</b>	<b>Tasa de Líquido</b>	<b>11</b>	<b>Plataforma de Producción</b>
<b>3</b>	<b>Relación Gas Líquido</b>	<b>12</b>	<b>Pericia en el Método</b>
<b>4</b>	<b>Comportamiento de Afluencia</b>	<b>13</b>	<b>Diámetro Revestidor</b>
<b>5</b>	<b>Profundidad</b>	<b>14</b>	<b>Diámetro del Eductor</b>
<b>6</b>	<b>Presión Estática</b>	<b>15</b>	<b>Grado de Desviación</b>
<b>7</b>	<b>Gravedad API</b>	<b>16</b>	<b>Producción de Parafinas</b>
<b>8</b>	<b>Temperatura</b>	<b>17</b>	<b>Acumulación de Escamas</b>
<b>9</b>	<b>Problemas de Arenamiento</b>	<b>18</b>	<b>Problemas de Corrosión</b>

Al consultarle a la muestra ¿Qué criterios influyen en la selección del **Sistema de Bombeo Hidráulico?**, esta respondió de la siguiente manera

<b>CRITERIOS</b>	<b>SI</b>	<b>%</b>	<b>NO</b>	<b>%</b>
Índice de Productividad	2	50	2	50
Tasa de Líquido	3	75	1	25
Corte de agua	1	25	2	50
Relación Gas Líquido	2	50	2	50
Comportamiento de Afluencia	2	50	2	50
Profundidad al tope de las Perf.	2	50	2	50
Presión Estática	2	50	2	50
Gravedad API	2	50	2	50
Temperatura en el fondo	1	25	3	75
Problemas de Arenamiento	3	75	1	25
Mecanismos de Producción	1	25	3	75
Localización del Pozo	1	25	3	75
Fuente de Energía Disponible	1	25	3	75
Plataforma de Producción	2	50	2	50
Pericia en el Método	1	25	3	75
Diámetro del Revestidor	2	50	2	50
Diámetro del Eductor	3	75	1	25
Tipo de Completación	1	25	2	50
Grado de Desviación	2	50	2	50
Prod. De Parafinas y Asfáltenos	3	75	1	25
Acumulación de Escamas	3	75	1	25
Problemas de Corrosión	3	75	1	25

Lo anterior indica que la muestra entrevistada señaló que los criterios que más influyen en la selección de los Sistemas de Bombeo Hidráulico son:

<b>1</b>	<b>Índice de Productividad</b>	<b>8</b>	<b>Problemas de Arenamiento</b>
<b>2</b>	<b>Tasa de Líquido</b>	<b>9</b>	<b>Diámetro Revestidor</b>
<b>3</b>	<b>Relación Gas Líquido</b>	<b>10</b>	<b>Diámetro del Eductor</b>
<b>4</b>	<b>Comportamiento de Afluencia</b>	<b>11</b>	<b>Grado de Desviación</b>
<b>5</b>	<b>Profundidad</b>	<b>12</b>	<b>Producción de Parafinas</b>
<b>6</b>	<b>Presión Estática</b>	<b>13</b>	<b>Acumulación de Escamas</b>
<b>7</b>	<b>Gravedad API</b>	<b>14</b>	<b>Problemas de Corrosión</b>

Al consultarle a la muestra ¿Qué criterios influyen en la selección del **Sistema de Levantamiento Artificial por Gas?**, esta respondió de la siguiente manera

CRITERIOS	SI	%	NO	%
Índice de Productividad	4	100	0	0
Tasa de Líquido	2	50	2	50
Corte de agua	1	25	3	75
Relación Gas Líquido	2	50	2	50
Comportamiento de Afluencia	4	100	0	0
Profundidad al tope de las Perf.	2	50	2	50
Presión Estática	3	75	1	25
Gravedad API	2	50	2	50
Temperatura en el fondo	1	25	3	75
Problemas de Arenamiento	1	25	3	75
Mecanismos de Producción	0	0	4	100
Localización del Pozo	1	25	3	75
Fuente de Energía Disponible	1	25	3	75
Plataforma de Producción	1	25	3	75
Pericia en el Método	1	25	3	75
Diámetro del Revestidor	3	75	1	25
Diámetro del Eductor	2	50	2	50
Tipo de Completación	1	25	3	75
Grado de Desviación	1	25	3	75
Prod. De Parafinas y Asfáltenos	2	50	2	50
Acumulación de Escamas	1	25	3	75
Problemas de Corrosión	2	50	2	50

Lo anterior indica que la muestra entrevistada señaló que los criterios que más influyen en la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial por Gas son:

<b>1</b>	<b>Índice de Productividad</b>	<b>7</b>	<b>Gravedad API</b>
<b>2</b>	<b>Tasa de Líquido</b>	<b>8</b>	<b>Diámetro Revestidor</b>
<b>3</b>	<b>Relación Gas Líquido</b>	<b>9</b>	<b>Diámetro del Eductor</b>
<b>4</b>	<b>Comportamiento de Afluencia</b>	<b>10</b>	<b>Producción de Parafinas</b>
<b>5</b>	<b>Profundidad</b>	<b>11</b>	<b>Problemas de Corrosión</b>
<b>6</b>	<b>Presión Estática</b>		

Al preguntar a los especialistas con respecto a las **fortalezas, debilidades, amenazas y oportunidades** de los distintos Sistemas de Levantamiento Artificial, se obtuvo la siguiente información.

### **Fortalezas del Bombeo Mecánico**

Sistema de Levantamiento con mayor auge en el mundo; Múltiples teorías que soportan el comportamiento del sistema completo; Costo de reemplazo de la bomba relativamente más económico que las BCP y BES; Disponibilidad de equipos electrónicos para diagnósticos de fallas de la bomba y sus componentes; Filosofía de automatización definida; Fácil de bajar y sacar del pozo; Bajo consumo de energía; Adaptable para zonas de crudos pesados y extrapesados; Sistema eficiente, simple y fácil de operar para el personal de campo; Adaptable a completaciones sencillas y múltiples; Flexible, se puede equiparar la tasa de desplazamiento con la capacidad del pozo cuando comienza a declinar; Disponible en diámetros diferentes; El sistema posee válvulas dobles lo cual permite bombear tanto en la carrera ascendente como en la carrera descendente; Tiene buen tiempo de vida útil, sino hay presencia de arena y corrosión.

### **Debilidades del Bombeo Mecánico**

Costo de inversión alto; Moderado manejo de finos; Deficiente ante presencia de gas libre; Presenta flotabilidad de cabillas ante crudos pesados y extrapesados; Limitación por la profundidad de asentamiento de la bomba, inclinación del pozo y por los volúmenes de fluidos a ser producidos; Presenta fallas por fatiga en el sistema de cabillas; Mediano índice de falla (TEF entre 10 – 14 meses/servicio.); Requiere revisión periódica del balanceo del equipo; Limitaciones de uso en pozos profundos: Crea problemas en localidades urbanas; Es pesado y voluminoso en operaciones costa afuera; Susceptible a los problemas de parafinas.

### **Fortalezas del Bombeo Electrosumergible**

Mayor capacidad de levantamiento; Profundidad de asentamiento no importa la inclinación del pozo; Menor requerimiento de dilución (Diluyente crudo Leona-22 API, en el caso de crudos de la FPO); Puede utilizarse en lugares lejanos o distantes de la estación de descarga; Maneja niveles de fluidos altos (aprox. 100.000 BPD); De fácil diagnóstico; Bajo porcentaje de ocurrencia de filtraciones de crudo a nivel del cabezal del pozo; Bajo índice de falla (TEF > 18 Meses/servicio), lo cual reduce la pérdida de producción diferida; Debido a su configuración genera calor en el paso del fluido por la bomba haciendo que disminuya la viscosidad; Separación del gas eficiente; Filosofía de automatización definida; Puede usarse en pozos con temperaturas menores a 450 F; Costo de levantamiento bajo para volúmenes apreciables de fluido; Usando tuberías especiales para el manejo de fluidos corrosivos, puede tener larga duración; Mantiene un comportamiento de producción estable;

### **Debilidades del Bombeo Electrosumergible**

Costo de inversión alto; Moderado manejo de finos; Deficiente ante la presencia de gas libre; Limitación en profundidades de asentamiento en pozos con altos doglegs (pata de perros); Alto consumo de energía; Requiere personal técnico altamente especializado para bajar y/o manejar el equipo del pozo; La presencia de arena afecta la bomba; La eficiencia volumétrica de la bomba es afectada por la viscosidad del crudo, emulsiones y espumas; Escaso manejo de escamas y parafinas; Requiere un sistema de suministro eléctrico de alta eficiencia; Su uso está limitado por las altas temperaturas del yacimiento mas el calor que el motor genera;

### **Fortalezas de la Bomba de Cavidad Progresiva**

Costo de inversión bajo; Manejo de Finos; Bajo costo de mantenimiento; Fácil de instalar y manejo en el pozo; Alta eficiencia en manejo de crudos pesados y

extrapesados; Bajo consumo de energía; Recomendable para zonas someras y medias de profundidad:

Bombas de alto caudal operadas a bajas frecuencias, pueden tener un tiempo de vida útil económicamente rentable.

### **Debilidades de la Bomba de Cavidad Progresiva**

Deficiente ante alta relación gas petróleo; El elastómero está limitado por la presencia de H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y crudos con alto contenido de aromáticos y la presencia de arena; Limitación en profundidad de asentamiento en pozos con altos doglegs e inclinación; Levantamiento limitado (requiere disponer de pozos cercanos a la estación de descarga); No puede usarse en pozos con alta temperatura (>200 F); Alta caída de presión en la tubería de producción debido a la presencia de la sarta de cabillas; Poco uso en crudos livianos;

Mediano índice de fallas (TEF entre 10 – 12 meses/servicio); Su vida útil disminuye con el incremento de fallas y paradas sucesivas; Alto costo de reparación de equipos de superficie.

### **Fortalezas del Bombeo Hidráulico**

Moderado manejo de finos; Puede usarse en altas temperaturas; Bajo costo de mantenimiento; Fácil de instalar y manejo en el pozo; Alta eficiencia en el manejo de medianos y livianos; Bajo consumo de energía; No requiere dilución o el uso de un diluyente para reducir la viscosidad; Puede bombear a baja presión; Maneja altos caudales; Puede manejar fluidos con alta relación gas petróleo; Se puede asentar a cualquier profundidad incluso en la sección horizontal.

### **Debilidades del Bombeo Hidráulico**

Deficiente ante alta presencia de arena; Levantamiento limitado (requiere disponer de pozos cercanos a la estación de descarga); Requiere fluido motriz para poder funcionar por lo que es necesario disponer de equipos hidráulicos en superficie; Alto costo de inversión; Diseño del sistema más complejo; La corrosión es un aspecto importante dependiendo del fluido motriz.

### **Fortalezas del Levantamiento Artificial por Gas**

Bajo costo por instalación, mantenimiento y supervisión; Fácil de instalar y sacar del pozo; Aplicable en pozos productores de crudos livianos, medianos, pesados, parafinosos, etc.; Fácil de diagnosticar; Puede manejar fluidos con presencia de finos y arena, a diferentes tasas con problemas mínimos; No crea problemas en localidades urbanas; La fuente de energía puede estar localizada remotamente; no tiene limitantes por diámetro del pozo, ni por su inclinación ni su asentamiento de válvulas; Se puede utilizar en pozo con alta RGP; Tiene una alta eficiencia, baja frecuencia de paradas y pérdidas por producción diferida.

### **Debilidades del Levantamiento Artificial por Gas**

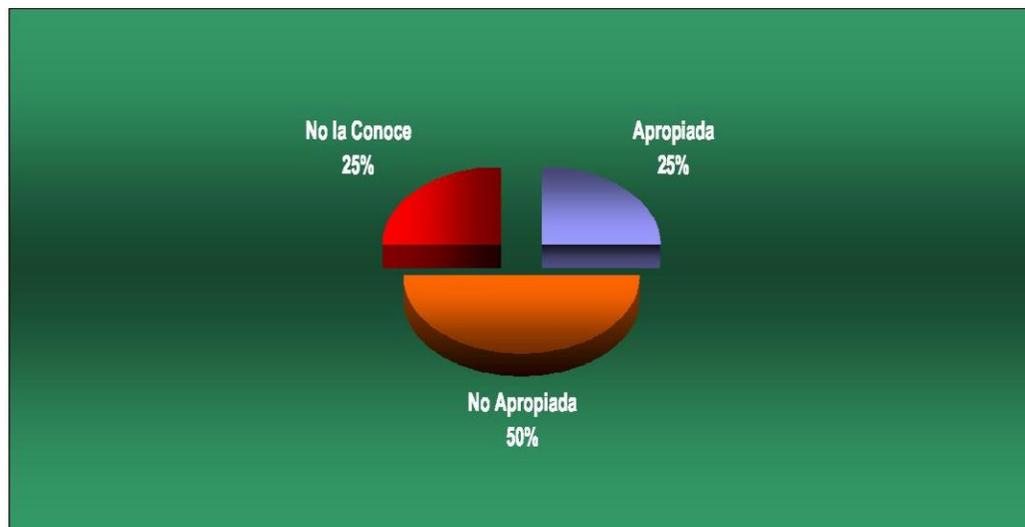
Alto costo de inversión (plantas compresoras para el manejo del gas) y mantenimiento (reparación de turbinas, etc.); Severas caídas de producción ante deficiencia de suministro de gas del sistema; Levantamiento limitado para crudos medianos y pesados (caso Morichal).

También se consulto a la muestra sobre que tan apropiadas son las metodologías de selección de Sistemas de Levantamiento Artificial existentes para lo cual se obtuvo el siguiente resultado

## Matriz de Evaluación Tecnológica

	Valor Absoluto	Valor Relativo
Apropiada	1	25
No Apropiada	2	50
No la conoce	1	25
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>100</b>

Gráficamente se observa el comportamiento de qué tan apropiada es la Matriz de Evaluación Tecnológica para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial.

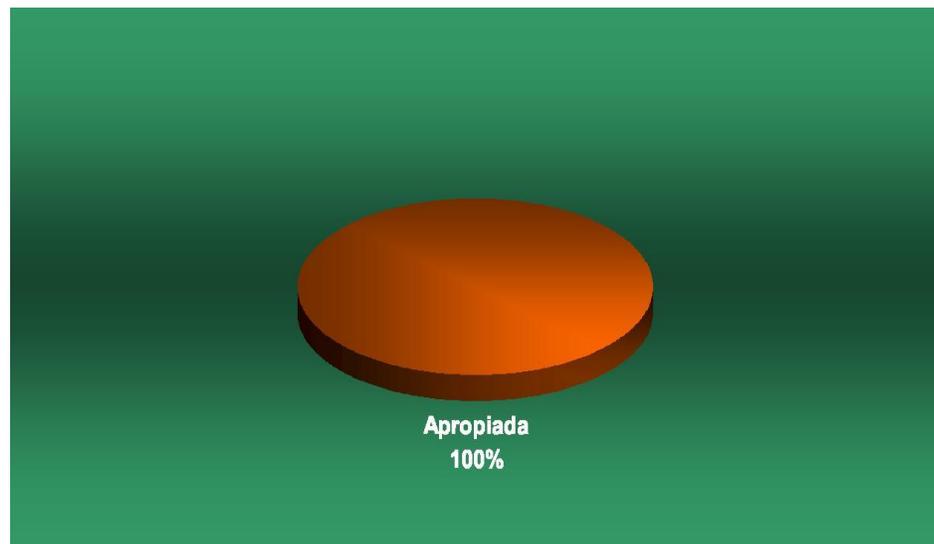


El 50% de la muestra opinó que el método de La Matriz de Evaluación Tecnológica no es apropiada para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial 25% indica que es apropiada y el otro 25% no la conoce

### Sistema Experto de Levantamiento Artificial

	Valor Absoluto	Valor Relativo
<b>Apropiada</b>	4	100
<b>No Apropiada</b>	0	0
<b>No la conoce</b>	0	0
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>100</b>

Gráficamente se observa el comportamiento de qué tan apropiado es el Sistema Experto de Levantamiento Artificial para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial.

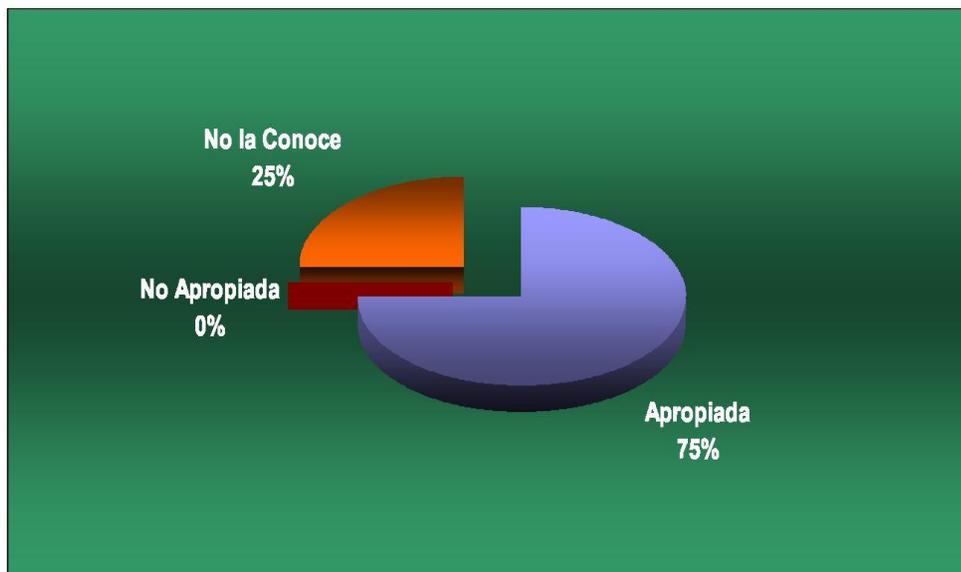


La totalidad de la muestra expresó que el Sistema Experto de Levantamiento Artificial es la metodología más apropiada para la selección de los Sistema de Levantamiento Artificial

## Metodología de Selección Óptima de Levantamiento Artificial

	Valor Absoluto	Valor Relativo
<b>Apropiada</b>	3	75
<b>No Apropiada</b>	0	0
<b>No la conoce</b>	1	25
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>100</b>

Gráficamente se observa el comportamiento de qué tan apropiada es la Metodología de Selección Óptima de Levantamiento Artificial para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial.



La muestra entrevistada refleja en un 75% que la Metodología Óptima de Levantamiento Artificial es apropiada para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial mientras que el restante 25% no la conoce.

En la última etapa de la metodología la de estructuración de criterios que incluye la jerarquización, ponderación y valoración de los criterios se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico para la jerarquización y ponderación y el Método de Curvas de Valoración para determinar las preferencias que tiene un Sistema de Levantamiento Artificial ante los criterios que predominan en un campo determinado. El segundo cuestionario (Apéndice I) aportó los resultados referentes a la Jerarquización de los criterios para cada tipo de Sistema de Levantamiento y los cuales se describen a continuación. Pero antes es conveniente destacar que los resultados de los pesos obtenidos se expresarán en forma

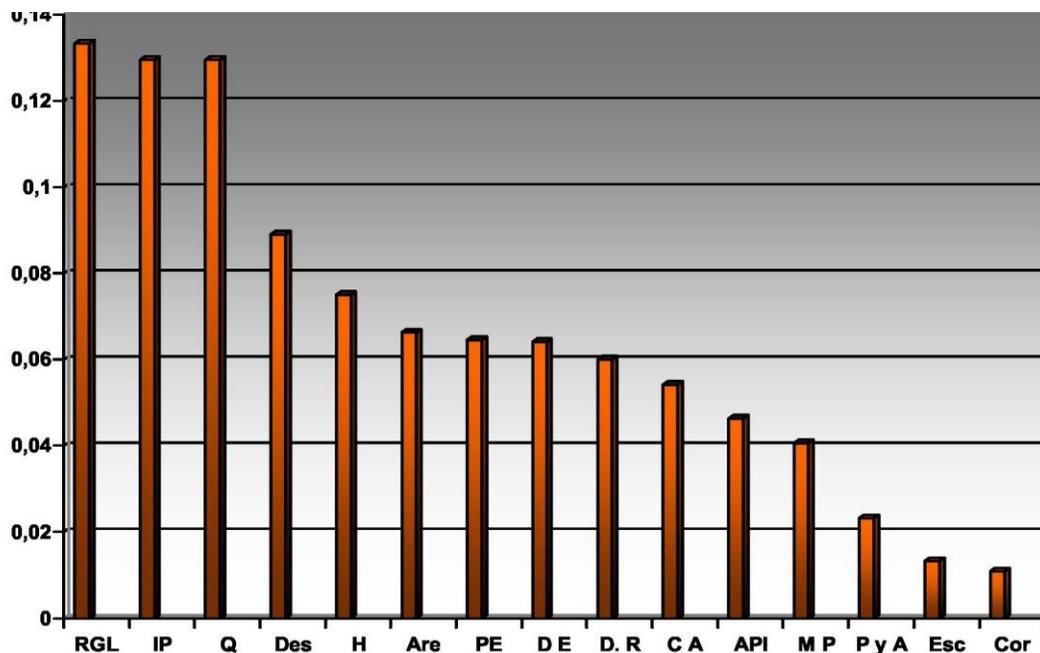
normalizada de forma que la suma de ellos sea uno (1) y todos los cálculos realizados para llegar a ellos se muestran en el Apéndice II.

Para el **Sistema de Bombeo Mecánico** los datos aportados por los especialistas consultados para determinar los pesos de los criterios y por ende su Jerarquización se muestran en la matriz de comparación por pares en el Apéndice II y a partir de esta se calculan los pesos de los criterios, y los cuales dan como resultados los siguientes:

CRITERIO	PESO
P	0,12959501
q	0,12959501
RGL	0,13330907
H	0,07500155
Pe	0,06456705
°API	0,0463832
Arenamiento	0,06629132
Mec. Prod.	0,0406343
Diam Rev	0,06011859
Diam. Educt	0,06412801
Desviación	0,0890244
Comp. Afluen	0,05414853
Prod. Para Asf	0,02310182
Acum.. Escamas	0,01320842
Prob. Corrosión	0,01089372

A partir de estos resultados se infieren que los criterios más importante en Sistema de Bombeo Mecánico son: la Relación Gas-Líquido, el Índice de Productividad y la Tasa de Líquido en primera y segunda instancia, seguidos del El Grado de Desviación del Pozo, La Profundidad, el Arenamiento, la Presión Estática, el Diámetro del Eductor, el Diámetro del Revestidor, el Comportamiento de Afluencia, la Gravedad API, el Mecanismo de Producción, la Producción de Parafinas y Asfáltenos, la Acumulación de Escamas y los Problemas de Corrosión; en ese orden respectivamente.

En la grafica se observa en forma jerarquizada los pesos de los criterios

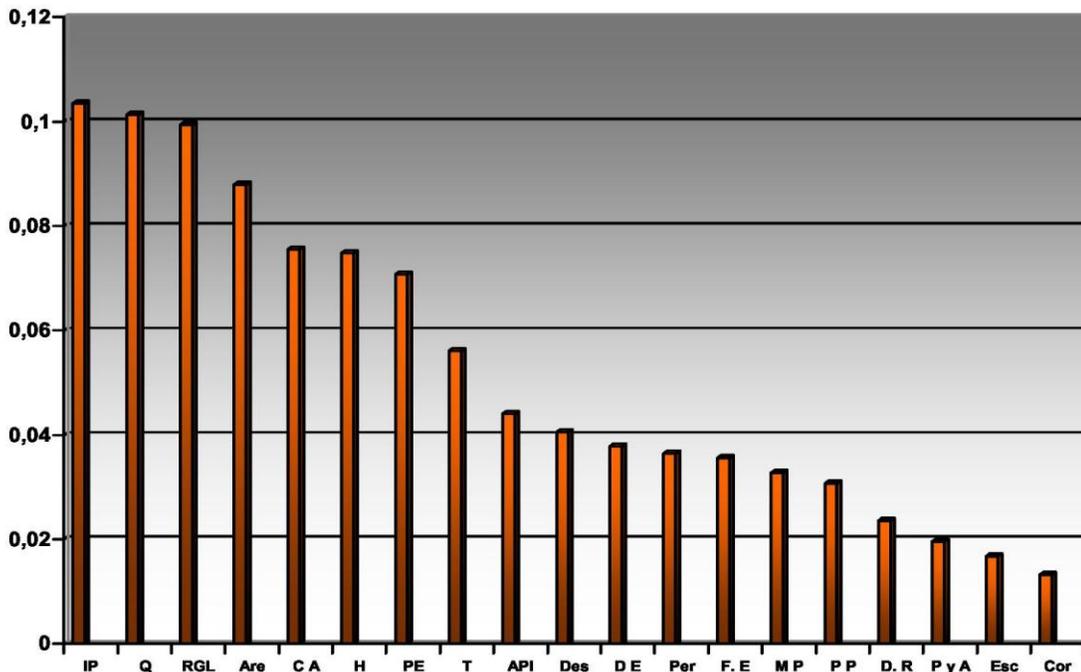


En el **Sistema de Bombeo Electrosumergible** los datos obtenidos se expresan en la matriz respectiva del Apéndice II donde los pesos de los criterios calculados a partir de la matriz de comparaciones por pares son los siguientes:

CRITERIOS	PESO
IP	0,10344927
q	0,1013087
RGL	0,09941331
H	0,07477359
Pe	0,07070007
°API	0,04402228
T	0,05610477
Arenamiento	0,08796841
Mec. Prod.	0,03275469
F. Energía	0,03552733
Plat. Prod	0,03065225
Pericia	0,03635019
Diam Rev	0,0235739
Diam. Educt	0,03784149
Desviación	0,04053246
Comp. Afluen	0,07549946
Prod. Para Asf	0,01955164
Acum..Escamas	0,01677282
Prob. Corrosión	0,01320337

Los criterios que resultan más importantes en el Sistema de Bombeo Electrosumergible son en orden de importancia El Índice de Productividad, La Tasa de Líquido, La Relación Gas-Líquido, El Arenamiento, El Comportamiento de Afluencia, La Profundidad, La Presión Estática, La Temperatura, La Gravedad API, El Grado de Desviación del Pozo, El Diámetro del Eductor, La Pericia en el Método, La Fuente de Energía Disponible, El Mecanismo de Producción, La Plataforma de Producción, El Diámetro del Revestidor, La producción de Parafinas y Asfaltenos, La Acumulación de Escamas y los Problemas de Corrosión.

En la grafica se observa en forma jerarquizada los pesos de los criterios

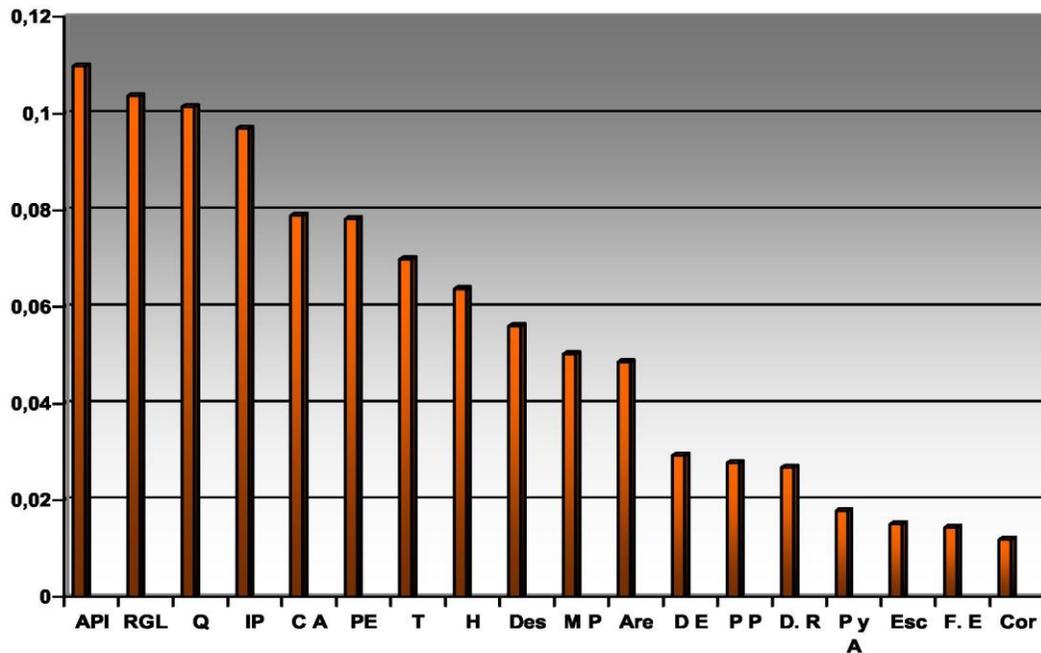


En cuanto al **Sistema de Bomba de Cavidad Progresiva** se recabaron los datos para el estudio de Jerarquización de criterios mostrados en el Apéndice II. Los Resultados obtenidos de los datos anteriores muestran a continuación los pesos de los criterios para el sistema en referencia.

CRITERIOS	PESO
IP	0,09695106
Q	0,10137997
RGL	0,10364142
H	0,06376366
Pe	0,07827839
°API	0,1098148
T	0,06984762
Arenamiento	0,04865366
Mec. Prod.	0,05020239
F. Energía	0,0143485
Plat. Prod	0,02767355
Diam Rev	0,02673482
Diam. Educt	0,02928323
Desviación	0,05603353
Comp. Afluen	0,07859021
Prod Para Asf	0,01776579
Acum.. Escamas	0,01510928
Prob. Corrosión	0,01192812

[Para La Bomba de Cavidad Progresiva los criterios están jerarquizados en de mayor a menor de la siguiente forma: La Gravedad API, La Relación Gas-Líquido. La Tasa de Líquido, El índice de Productividad, El Comportamiento de Afluencia, La Presión Estática, La Temperatura, La Profundidad, El Grado de Desviación del Pozo, El Mecanismo de Producción, El Arenamiento, El Diámetro del Eductor, La Plataforma de Producción, El Diámetro del Revestidor, La Producción de Parafinas y Asfaltenos, La Acumulación de Escamas, La Fuente de Energía Disponible y Los Problemas de Corrosión.

En la grafica se puede observar en forma jerarquizada los pesos de los criterios.



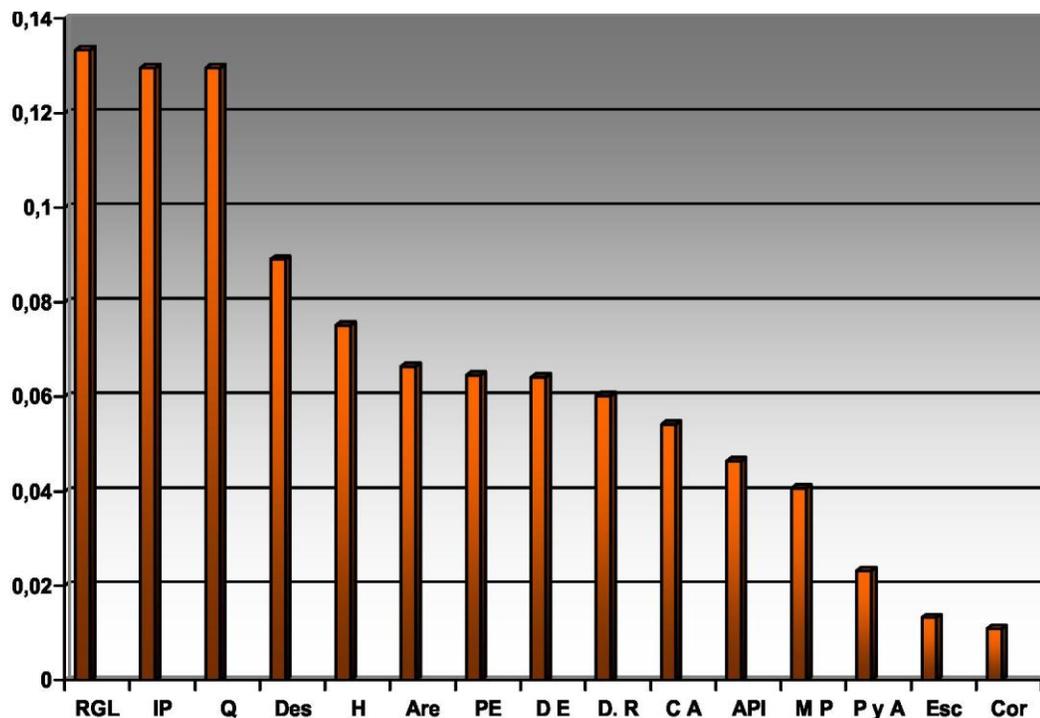
Por su parte en **El Sistema de Bombeo Hidráulico** los datos que aportaron los expertos se resumen en el Apéndice II:

Los cálculos reflejan los siguientes resultados de los pesos que jerarquizan los criterios que influyen en El Sistema de Bombeo Mecánico

CRITERIOS	PESO
IP	0,13717037
Q	0,13717037
RGL	0,13317936
H	0,07908336
Pe	0,0584112
°API	0,05310543
Arenamiento	0,0703457
Mec. Prod.	0,0399682
Diam Rev	0,03724134
Diam. Educt	0,03742441
Desviación	0,09601914
Comp. Afluen	0,0669213
Prod Para Asf	0,02199444
Acum. Escamas	0,02268294
Prob. Corrosión	0,00928244

Los resultados indican que los criterios de mayor relevancia son El índice de Productividad y La Tasa de Líquido en el mismo orden seguidos de La Relación Gas- Líquido, El Grado de Desviación del Pozo, La Profundidad, Los Problemas de Arenamiento, El Comportamiento de Afluencia, La Presión Estática, La Gravedad API, El Mecanismo de Producción, El Diámetro del Eductor, El Diámetro del Revestidor, La Acumulación de Escamas, La Producción de Parafinas y Asfaltenos y por último Los Problemas de Corrosión.

En la grafica se observa en forma jerarquizada los pesos de los criterios



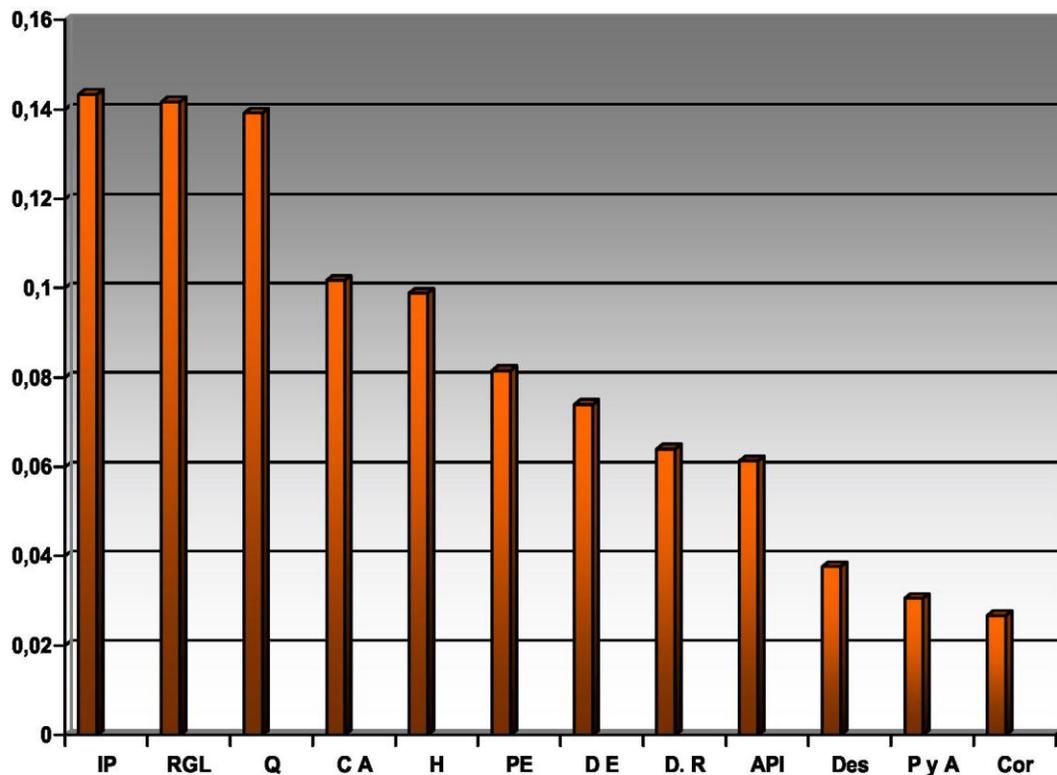
En **El Sistema de Levantamiento Artificial por Gas** los datos suministrados se reflejan en el Apéndice II

De estos datos resulta la ponderación de los criterios que afectan al mencionado Sistema de Levantamiento los cuales se listan seguidamente:

CRITERIOS	PESO
IP	0,14332404
q	0,13914856
RGL	0,14167381
H	0,09854044
Pe	0,08149433
°API	0,0613016
Diam Rev	0,06398692
Diam Educt	0,07396679
Desviación	0,03763914
Comp. Afluen	0,10172811
Prod. Paraf Asf	0,03056148
Prob. Corrosión	0,02663477

Como se puede apreciar la jerarquización de los criterios viene dada del más al menos importante de la siguiente manera: El Índice de Productividad, La Relación Gas-Líquido, La Tasa de Líquido, El Comportamiento de Afluencia, La Profundidad, La Presión Estática, El Diámetro del Eductor, El Diámetro del Revestidor, La Gravedad API, El Grado de Desviación del Pozo, La Producción de Parafinas y Asfaltenos y Los Problemas de Corrosión.

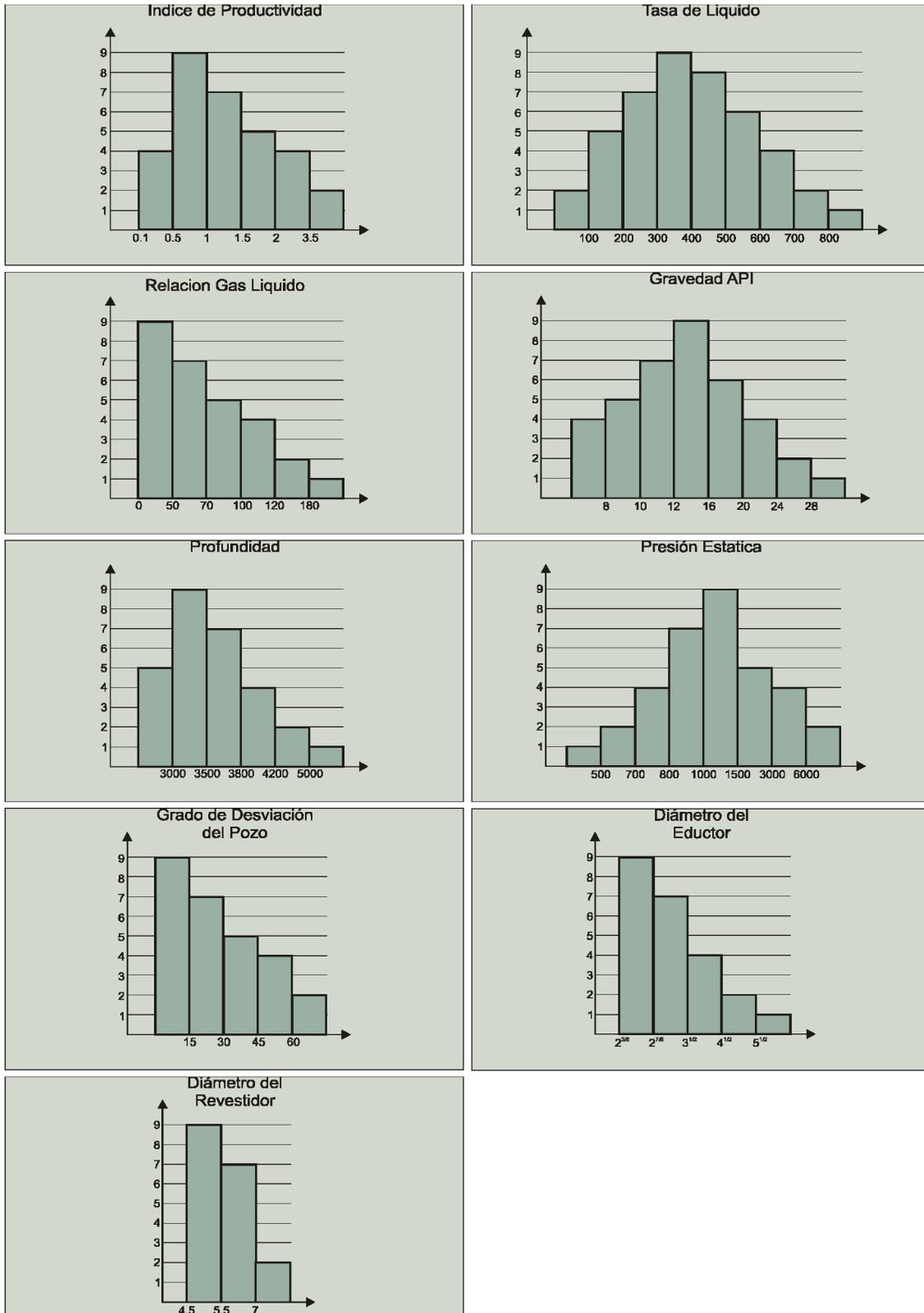
En la grafica se observa en forma jerarquizada los pesos de los criterios



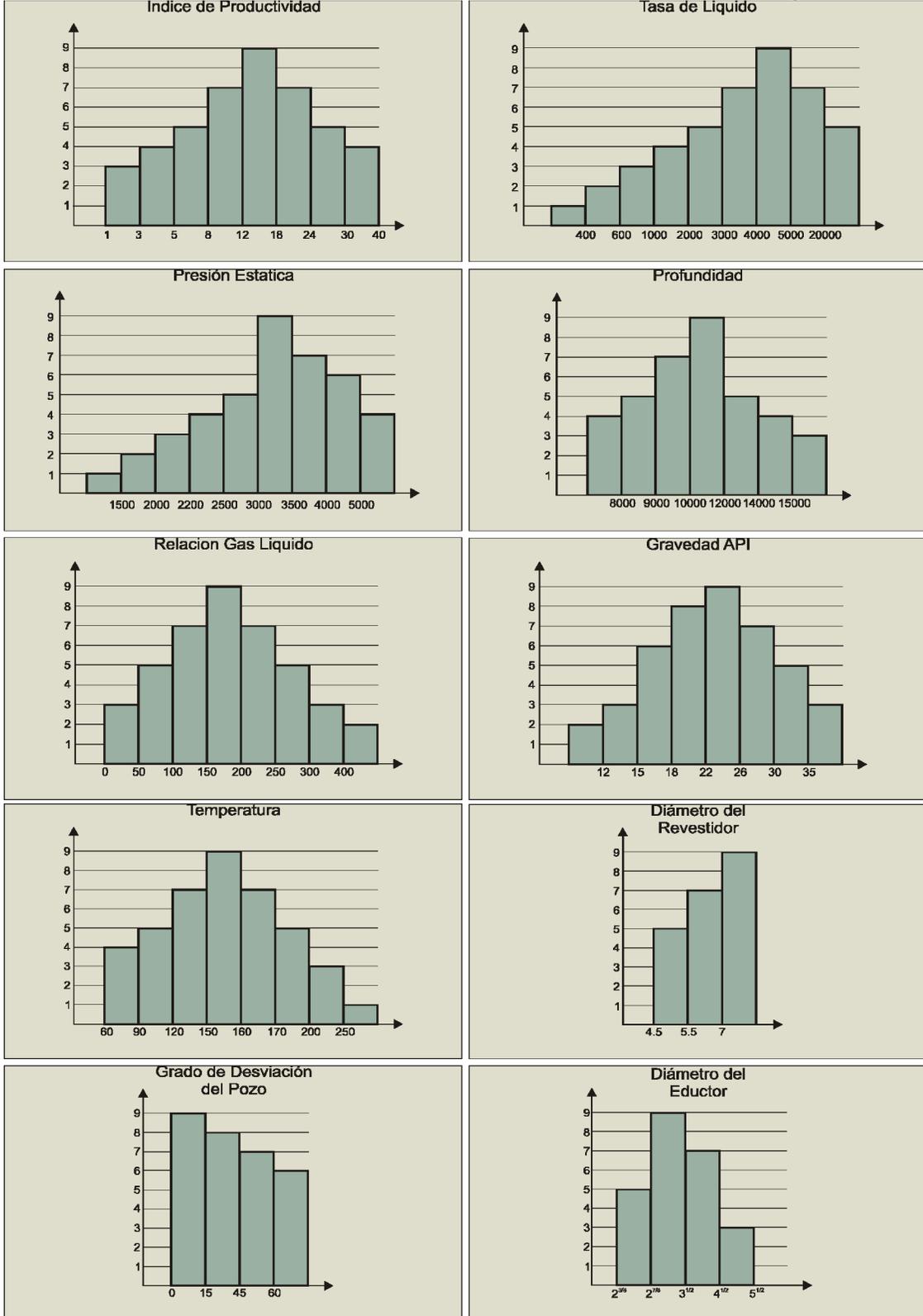
Finalmente para concluir esta última etapa del método propuesto se muestran las Curvas de Valoración obtenidas del tercer cuestionario (apéndice I) que se les administró a los especialistas. A partir de estos resultados se podrá determinar las preferencias que tienen Los Sistemas de Levantamiento Artificial involucrados en el presente estudio, a ser implementados ante los criterios que están presentes en el pozo o en el yacimiento.

Ante esta afirmación es importante destacar que el sistema de levantamiento que se recomienda aplicar es el más propicio ante los criterios que están presente en el campo en cuestión, pero no necesariamente el que debe ser implementado ya esta recomendación no toma en cuenta los otros tipos de criterios descartados en este estudio como son los de carácter económico o los de diseño del equipo que podrían inclinar la preferencia hacia otro Sistema de Levantamiento.

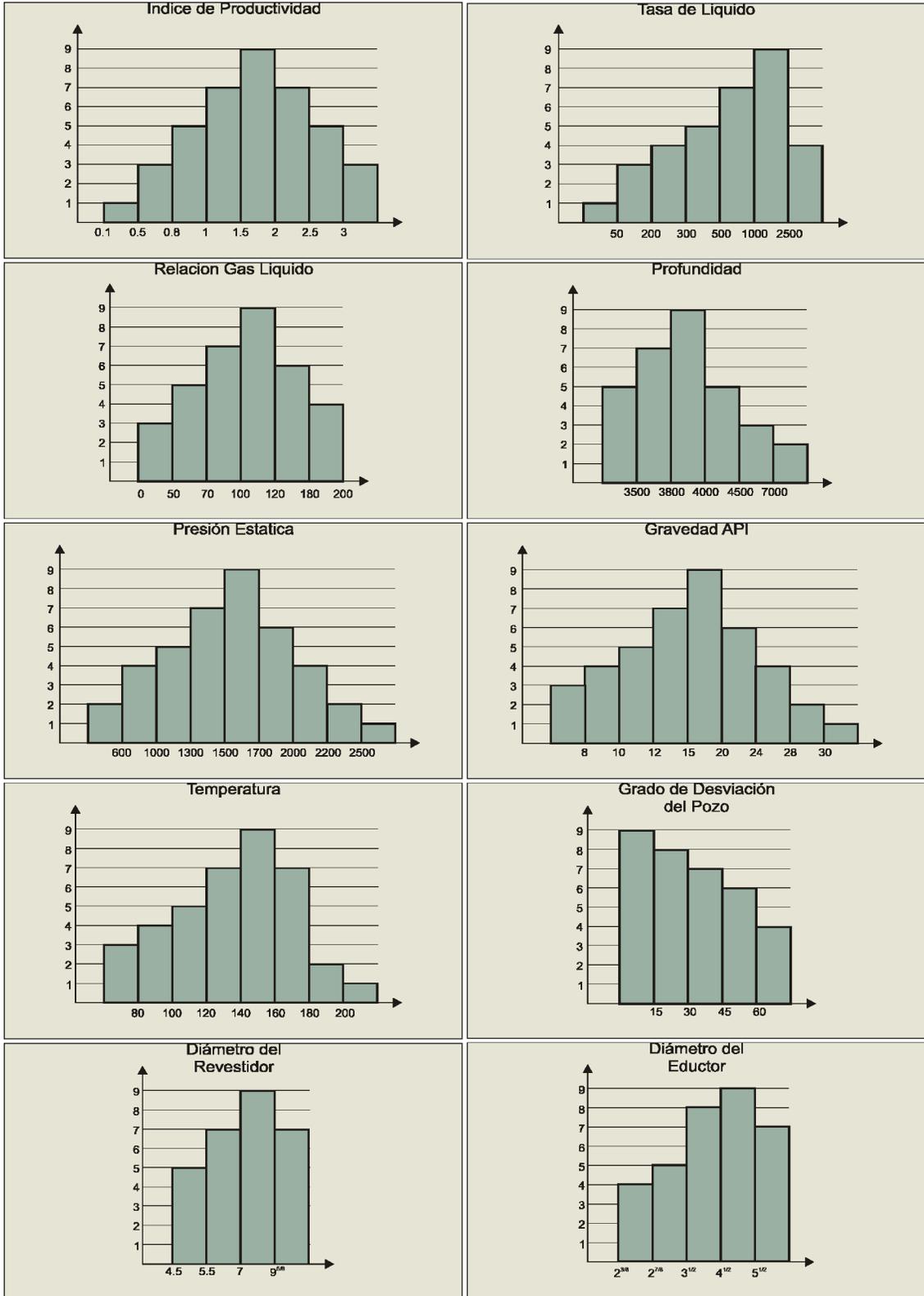
## Curvas de Valoración para el Sistema de Bombeo Mecánico.



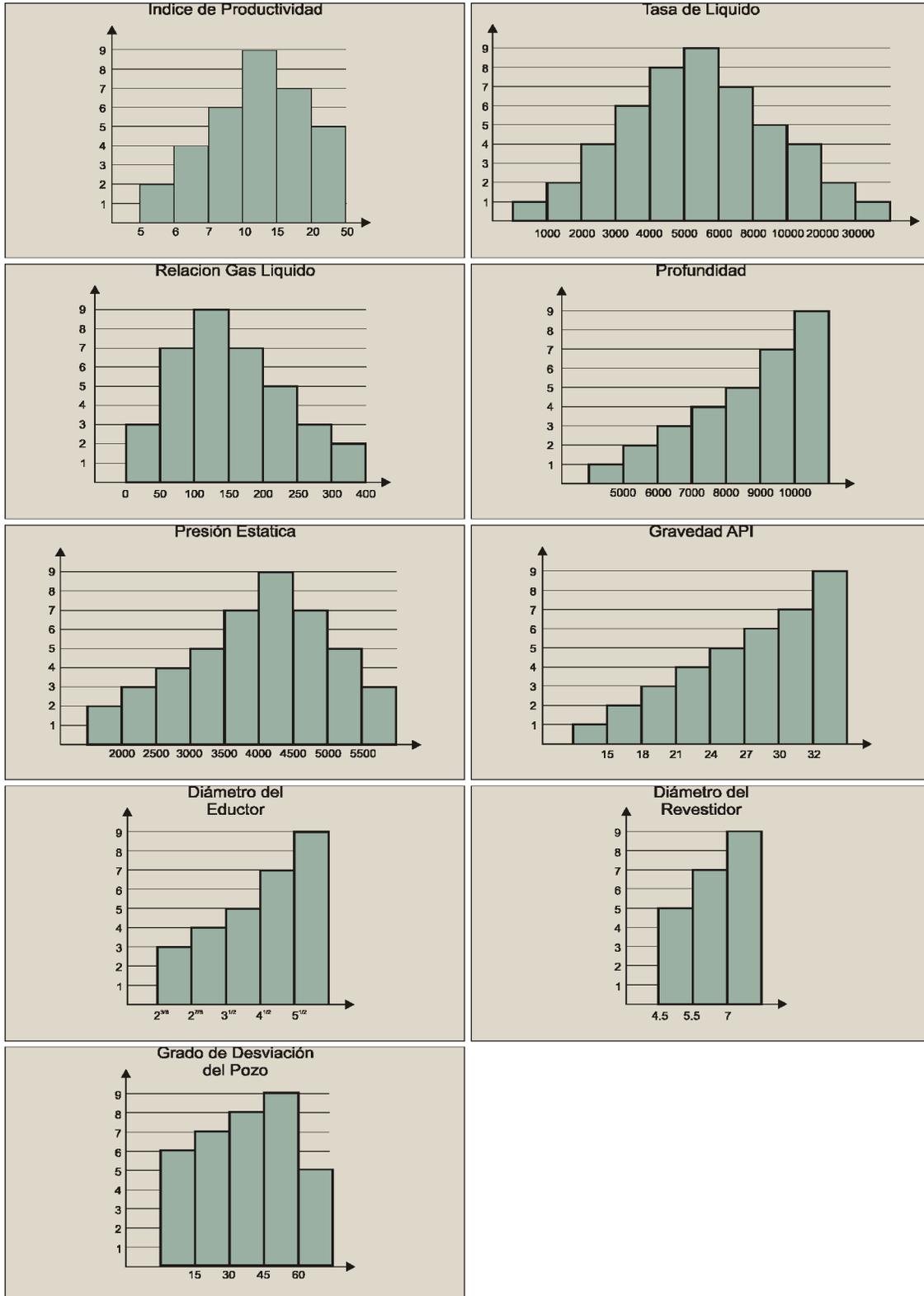
## Curvas de Valoración para el Sistema de Bombeo Electrosomergible.



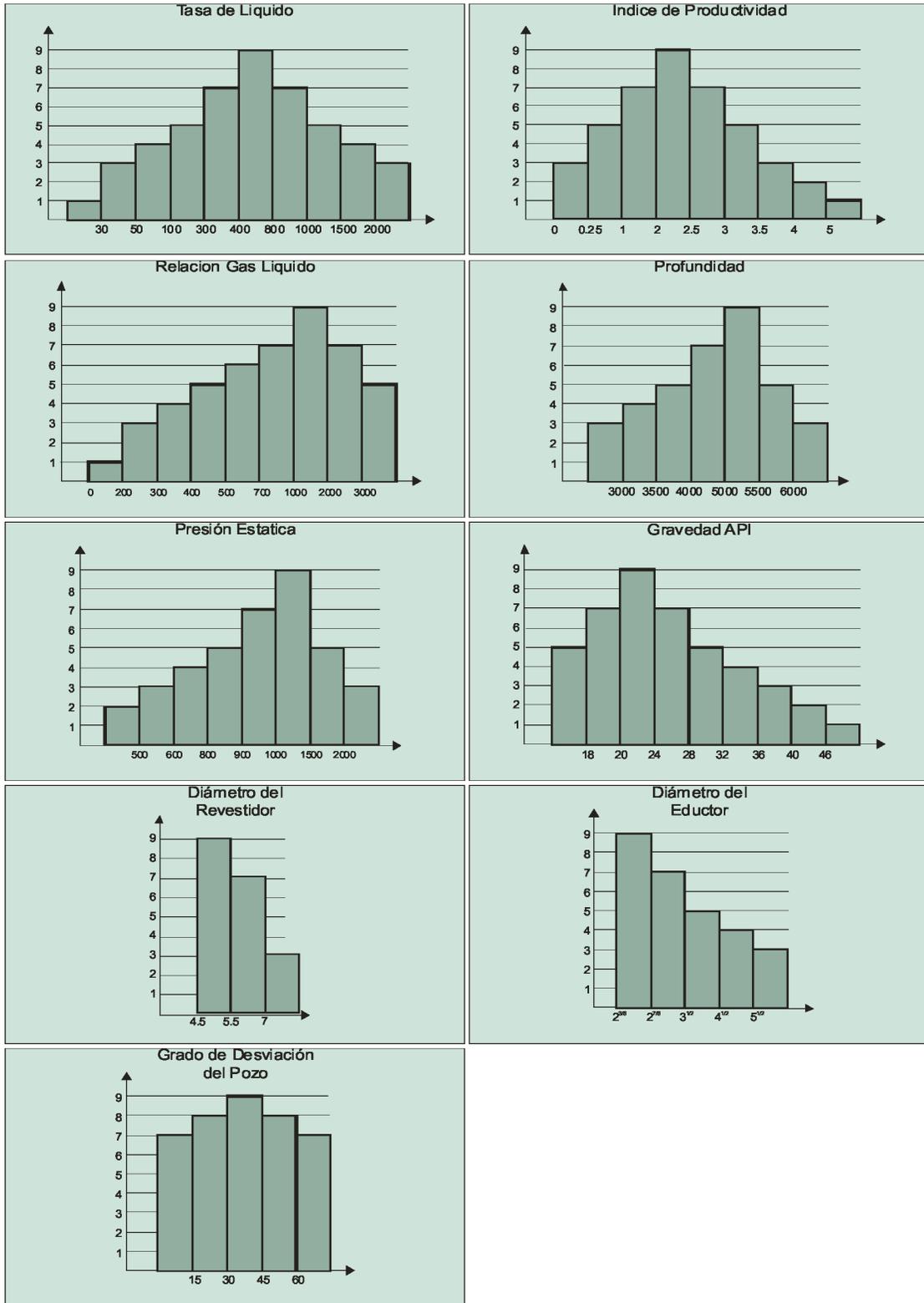
## Curvas de Valoración para el Sistema de Bombas Cavidad Progressiva



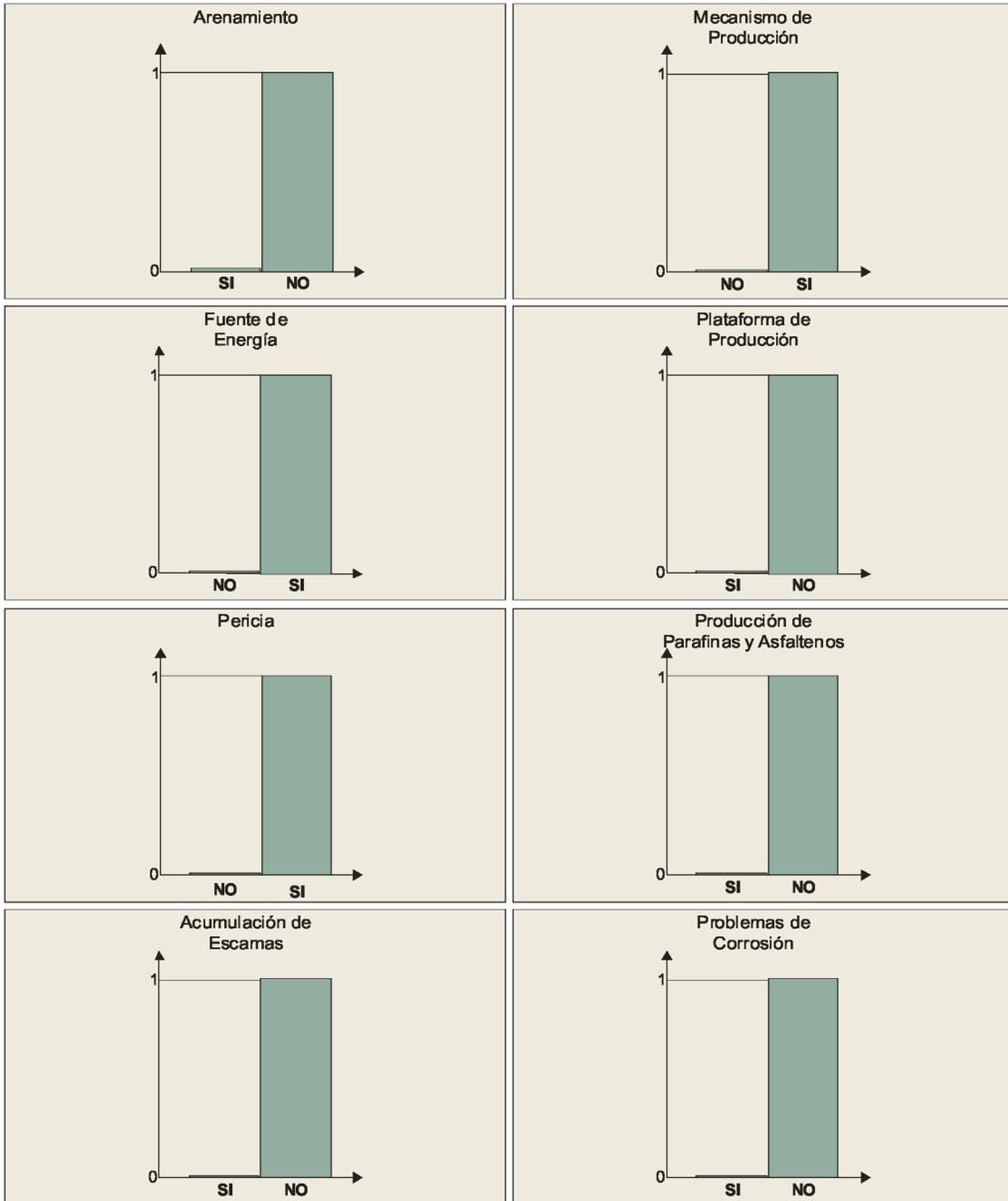
## Curvas de Valoración para el Sistema de Bombeo Hidráulico



Curvas de Valoración para el Sistema de Levantamiento Artificial por Gas.



## Curvas de Binarias de Valoración



## Ejemplo de la Metodología

A partir de la siguiente data se determinará el sistema de Levantamiento Artificial más adecuado a ser implementado

Índice de Productividad	0.5
Tasa de Liquido	100
Relación Gas Liquido	250
Profundidad	7000'
Presión Estática	900
Gravedad API	22
Temperatura de fondo	140
Diámetro del Revestidor	7"
Diámetro del Eductor	3 1/2 "
Grado de Desviación del Pozo	80°

$$Pm_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} f_{ij}(x)$$

Criterio	Data	B. M		B.E.S		B.C.P		B.H		L.A.G	
		w	F(x)								
IP	0,5	0.1296	9	0.1034	1	0.0970	3	0.1371	1	0.1433	5
q	100	0.1296	5	0.1013	1	0.1014	3	0.1371	1	0.1391	5
RGL	250	0.1333	1	0.0994	5	0.1036	4	0.1332	3	0.1417	3
H	7000	0.0750	1	0.0748	4	0.0638	2	0.0791	4	0.0985	3
Pe	900	0.0646	7	0.0707	1	0.0783	4	0.0584	2	0.0815	7
API	22	0.0464	4	0.0440	9	0.1098	6	0.0531	4	0.0613	9
T	140	-	-	0.0561	7	0.0699	9	-	-	-	-
Arenamiento	NO	0.0663	1	0.0880	1	0.0487	1	0.0704	1	-	-
Mec. Prod.	SI	0.0406	1	0.0328	1	0.0502	1	0.0400	1	-	-
F. Energía	SI	-	-	0.0355	1	0.0104	1	-	-	-	-
Plat. Prod.	NO	-	-	0.0307	1	0.0277	1	-	-	-	-
Pericia	SI	-	-	0.0364	1	-	-	-	-	-	-
Diam Rev	7	0.0601	7	0.0236	9	0.0267	9	0.0372	9	0.0640	3
Diam. Educt	3 1/2	0.0641	4	0.0378	9	0.0293	8	0.0374	5	0.0740	5
Desviación	80	0.0890	2	0.0405	6	0.0560	4	0.0960	5	0.0376	7
Comp. Afluen	SI	0.0541	1	0.0755	1	0.0786	1	0.0669	1	0.1017	1
Prod. Para Asf	NO	0.0231	1	0.0196	1	0.0178	1	0.0220	1	0.0351	1
Acum.. Escamas	NO	0.0132	1	0.0168	1	0.0151	1	0.0227	1	-	-
Prob. Corrosión	NO	0.0109	1	0.0132	1	0.0119	1	0.0093	1	0.0266	1
<b>Preferencia del Método (Pm<sub>i</sub>)</b>		<b>3.7238</b>		<b>3.0044</b>		<b>3.9674</b>		<b>2.5525</b>		<b>4.3851</b>	

De acuerdo a la data suministrada y a los resultados obtenidos en la investigación, parte de la cual es mostrada en la tabla anterior se desprende que el Levantamiento Artificial por Gas es el sistema más adecuado para ser implementado.

## CAPITULO 7

### EVALUACIÓN DEL PROYECTO

Premisas de evaluación:

DATOS GENERALES / RESUMEN EJECUTIVO	PREMISAS
OBJETIVO / PROPÓSITOS / METAS	POR TRATARSE DE UN PROYECTO PERSONAL DE ÍNDOLE ACADÉMICO Y EL SABER EL EXACTO CONOCIMIENTO DE QUE ES LO QUE SE QUIERE LOGRAR TODOS LOS DATOS GENERALES Y EL RESUMEN EJECUTIVO ESTÁN MUY BIEN DEFINIDOS POR LO QUE SE LES EVALÚA CON LA MÍNIMA CALIFICACIÓN
DESCRIPCIÓN DE ALCANCE / PREMISAS / RESTRICCIONES	
ESTRUCTURA DESAGREGADA DE TRABAJO	
ENTREGABLES	
<b>ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS</b>	
EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA	SE EVALUARON TODAS LAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES
EVALUACIÓN DE OPCIONES	SE EVALUARON LAS MEJORES OPCIONES
SELECCIÓN MEJOR OPCIÓN / JUSTIFICACIÓN	SE ENCUENTRA BIEN JUSTIFICADA TODAS LAS OPCIONES
<b>ANÁLISIS DE RIESGOS</b>	
IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	SE ANALIZARON LA TODAS LAS ALTERNATIVAS QUE PUDIERAN PERJUDICAR O BENEFICIAR AL PROYECTO
EVALUACIÓN DE RIESGOS	
PLANES DE RESPUESTA AL RIESGO	
<b>ESTIMADOS DE COSTO</b>	
PREMISAS / BASES DE ESTIMACIÓN	AL TRATARSE DE UN PROYECTO DE ÍNDOLE ACADÉMICO NO SE TOMARON EN CUENTA LOS COSTOS DEL MISMO YA QUE LOS MISMOS FUERON REDUCIDOS AL MÍNIMO Y LOS POCOS INCURRIDOS ASUMIDOS POR EL AUTOR
SOPORTES ESTIMACIÓN DE COSTOS	
MANEJO DE IMPREVISTOS / HOLGURAS	
<b>PLAN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO</b>	
PREMISAS / BASES DE ESTIMACIÓN	EN GENERAL EL PLAN D EJECUCIÓN ESTA MUY BIEN DEFINIDO HASTA NIVELES DE DETALLES
CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	
HITOS / ENTREGABLES	

De la aplicación de esta herramienta mostrada en la tabla siguiente, se puede concluir que en términos generales el proyecto está muy bien definido, pues tiene un nivel aceptable superior a los 126 puntos. Sin embargo, el equipo que lleva a cabo el proyecto debe prestar atención en que si se pretende lograr resultados de índole comercial si se debe realizar todos los estimados de costos necesarios.

### 5.7- INFORME DE EVALUACIÓN DEL GRADO DE DEFINICIÓN DEL PROYECTO

GERENCIA DE PROYECTOS							Fecha: JUN 2010
PROYECTO	DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA EN LA SELECCIÓN DE UNA FAMILIA DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL						
	NIVEL DE DEFINICIÓN						Puntaje
	0	1	2	3	4	5	
<b>DATOS GENERALES / RESUMEN EJECUTIVO</b>							
OBJETIVO / PROPÓSITOS / METAS	0	10	15	25	35	50	10
DESCRIPCIÓN DE ALCANCE / PREMISAS / RESTRICCIONES	0	6	9	15	21	30	6
ESTRUCTURA DESAGREGADA DE TRABAJO	0	6	9	15	21	30	6
ENTREGABLES	0	6	9	15	21	30	6
BENEFICIOS / JUSTIFICACIÓN	0	6	9	15	21	30	6
29%	34					170	34
<b>ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS</b>							
EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA	0	6	9	15	21	30	6
EVALUACIÓN DE OPCIONES	0	4	6	10	14	20	4
SELECCIÓN MEJOR OPCIÓN / JUSTIFICACIÓN	0	8	12	20	28	40	8
21%	18					110	18
<b>ANÁLISIS DE RIESGOS</b>							
IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	0	6	9	15	21	30	6
EVALUACIÓN DE RIESGOS	0	6	9	15	21	30	6
PLANES DE RESPUESTA AL RIESGO	0	6	9	15	21	30	6
12%	18					90	18
<b>ESTIMADOS DE COSTO</b>							
PREMISAS / BASES DE ESTIMACIÓN	0	6	9	15	21	30	0
SOPORTES ESTIMACIÓN DE COSTOS	0	10	15	25	35	50	0
MANEJO DE IMPREVISTOS / HOLGURAS	0	6	9	15	21	30	0
5%	22					110	0
<b>PLAN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO</b>							
PREMISAS / BASES DE ESTIMACIÓN	0	10	15	25	35	50	10
CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	0	14	21	35	49	70	21
HITOS / ENTREGABLES	0	10	15	25	35	50	10
23%	34					170	41
100%	Puntaje mínimo	126			Puntaje máximo	550	111

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Las conclusiones surgidas después de analizar los resultados obtenidos en este estudio se tiene que:

- La metodología propuesta permite identificar, entender y evaluar las partes que componen el problema en estudio, que se refiere a la selección del SLA adecuado a condiciones de operación que se pueden calificar de normales, canaliza varias técnicas para coadyuvar a la eficiente selección de un SLA que resulte adecuado a un campo en particular.
- Los criterios que influyen para cada SLA proporcionan una base fidedigna de estudio, garantizada por la experticia de los especialistas consultados, sin embargo caben dos comentarios:
  1. La consistencia de la matriz de comparaciones pareadas utilizada para la ponderación no resultó ser muy alta, ni se pudo comprobar la transitividad de los juicios emitidos por los expertos. Mayores iteraciones y más tiempo de discusión parecen ser requisitos para validar conceptualmente el modelo de decisión.
  2. La independencia de los criterios seleccionados ni de las preferencias involucradas fue verificada en profundidad. Todos los expertos coincidieron en que los criterios mencionados deben ser considerados, las posibles imbricaciones no fueron exploradas. Este modelo lineal propuesto conforma una primera aproximación cuyo grado de precisión debe y puede ser comprobado.
- La metodología, por su flexibilidad puede ser adaptada a otras situaciones más específicas, como pudiera ser el de los bitumines, previa consideración de sus particularidades.
- La metodología presenta una forma sistematizada de integración de conocimientos en el área de investigación de operaciones para la toma de decisiones con conocimientos en Ingeniería de Producción actualizados en materia de selección de SLA aplicable a la situación descrita

- Se puede afirmar, revisando los pesos obtenidos por los criterios comunes a los SLA estudiados, que los criterios más importantes resultaron ser el Índice de Productividad, la Tasa de Líquido y la Relación Gas Líquido.
- Las Curvas de Valoración desarrolladas en esta metodología son el producto de estudios detallados y de la amplia pericia de los especialistas consultados en las distintas áreas de producción del país. su validación independiente también puede ser emprendida.
- El alcance del estudio presentado es esencialmente técnico, no toma en cuenta criterios de tipo económico o los asociados al diseño de equipos, por lo cual la prescripción que resulta del modelo para implementar un SLA determinado es un insumo más en la decisión más no es necesariamente el que deba aplicarse.

## **RECOMENDACIONES**

Entre las recomendaciones surgidas después de este estudio que pudieran fortalecer los resultados obtenidos tenemos:

- Ampliar la base de consulta a por lo menos 10 especialistas de modo que los resultados sean lo más confiables posible.
- Garantizar que los especialistas que intervengan en el estudio tengan la disposición y el tiempo de participar en el proceso, ya que muchas de las dificultades al realizar este trabajo fue este factor.
- Para reducir la dispersión de la respuesta y obtener matrices de evaluación consistentes se recomienda estudiar la asignación de pesos a las opiniones de los expertos de acuerdo a sus años de experiencia, trabajos de campo, trabajos de investigación realizados, etc.
- Realizar un análisis que relacione los criterios de tipo económico y los de diseño del equipo utilizando la metodología desarrollada para sustentar la decisión técnica preliminar.
- Realizar un programa que integre todos los criterios y que automatice los cálculos reporte las preferencias a que den lugar, lo cual representaría un ahorro importante de tiempo, material humano y dinero.

- Incorporar otros SLA (o sus variantes) para lograr ampliar el universo de posibilidades de aplicación y de este modo lograr una selección aún más adecuada del SLA.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIAS, FIDIAS** (1999). El Proyecto de investigación: guía para su elaboración. Episteme. Caracas
- BAKER, DAVID** (2008). Strategic Change Management. Editorial Chandos Publishing, Oxford
- BALLESTRINI ACUÑA, Miriam.** (2006). Como se elabora el Proyecto de Investigación (Para estudios formulativos o explorativos, descriptivos, diagnóstico, evaluativos, formulación de hipótesis causales, experimentales y los proyectos factibles); Servicio Editorial Consultores Asociados, Caracas.
- CHACÓN M, Isolmar del C..** (2000). Metodología para la Aplicación del Algoritmo de optimización de Pozos de Levantamiento Artificial por Gas por Medición de Temperatura; U.C.V, Escuela de Petróleo, Caracas.
- CARRASQUERO, Néstor.** (1996). Un Método Interactivo para Aislar y Explorar un Conjunto de Soluciones de Compromiso. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Caracas.
- CARVAJAL, Oswaldo.** (1999.). Metodología para la Determinación de Objetivos en Problemas de Investigación de Operaciones. U.C.V., Caracas.
- ESCALONA, Víctor.** (1999). Análisis de los Modelos de Selección de Sistemas de Levantamiento Artificial Aplicados a Pozos y/o Yacimientos. U.C.V, Escuela de Petróleo, Caracas. (Material en Revisión)
- GIUSTI, Gustavo.** (1999). Análisis Evaluación y Selección de los Factores que afectan la Escogencia de un Sistema de Levantamiento Artificial en Áreas Tradicionales de Cerro Negro – Morichal. U.C.V, Escuela de Petróleo, Caracas.
- HERNÁNDEZ, Sixto.** (2003). Estadística Aplicada a la Educación. Editorial Panapo. Caracas.
- KEENEY, R. y RAIFFA, H.**( 1976), Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. Wiley, New York.
- LAGOVEN, Filial de Petróleo de Venezuela.** (1989.). Los Antecedentes (Origen y Consolidación de una Empresa Petrolera). Caracas.
- MC CRIMMON, K. R.** (1973). An overview of multiple objectives decision making. University of South Carolina Press.
- MC CONKEY, Dale.**( 1985.). Administración por Resultados. Editorial Norma.
- MONDELO, N.** (1996.). Proceso analítico jerárquico como herramienta para la toma de decisiones. U.C.V, Facultad de Ingeniería, Caracas.
- MORRISEY, George.** (1996.). Planeación a Largo Plazo: Creando su Propia Estrategia. Prentice Hall.
- PENIWATI, K.** (1996.). The analitic hierarvhy process: The possibility theorem for group decision making. Simon Frasier University, Burnaby, Canadá.
- PDVSA.** (2001). Reporte de producción, PDVSA Exploración y Producción, Caracas.

- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE.** (2008). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). Fourth Edition, Newtown Square
- REYES, Yamila.** (1999). Optimización del Sistema Experto de Levantamiento Artificial. U.C.V, Escuela de Petróleo, Caracas.
- ROY, B.** (1985). Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision Economica, Paris.
- SAATY, T.** (1977). Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy. Wharton School, University of Pennsylvania.
- SAATY, T.** (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill International Book Co. Pittsburg, Pa.
- SAATY, T. y L. G: VARGAS.** (1991). Prediction, projecting and forecasting. Kluwer Academia Publishers, Norwell, Mass.
- SABINO, Carlos.** (2002). Proceso de Investigación Científica. Editorial Panapo, C.A. Caracas.
- SALLENAVE, Jean Paul.** (1985.). Gerencia y Planificación Estratégica. Editorial Norma.
- SANCHES, Rebeca.** (1997). Enfoque Multicriterio en la Minimización del Impacto de Obras para el Control Ambiental. U.C.V., Caracas.
- SILVA CORTEZ, Luis Enrique.** (2000). Programa para la Selección de un Sistema Óptimo de Levantamiento Artificial. U.C.V, Escuela de Petróleo, Caracas.
- UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA EXPERIMENTAL LIBERTADOR.** (2008). Norma de Metodología de Investigación. Caracas.
- VALBUENA, Antonio.**( 2001). Evaluación en el Proceso de Enseñanza de Aprendizaje. Editorial Cobo.

# **APÉNDICE I**

## **CUESTIONARIOS REALIZADOS**

## APÉNDICE I. Cuestionarios utilizados en el estudio

### Cuestionario No. 1

1.- Indique que criterios influyen en la selección del Sistema de Levantamiento Artificial

<b>Criterios</b>	<b>BM</b>	<b>BES</b>	<b>BCP</b>	<b>BH</b>	<b>LAG</b>
Índice de Productividad					
Tasa de Líquido					
Relación Gas Líquido					
Profundidad tope de Perf.					
Presión Estática					
Gravedad A. P.I.					
Temperatura en el fondo					
Prob. de Arenamiento					
Mec. de Prod. Del Yacimiento					
Localización del Pozo					
Fuente de Energía Disp.					
Plataforma de producción					
Pericia en el Método					
Diámetro del Revestidor					
Diámetro del Eductor					
Grado de Desviación Hoyo					
Comportamiento de Afluencia					
Prod. de Parafina y Asfáltenos					
Acumulación de Escamas					
Problemas de Corrosión					
Corte de Agua					

2.- Que fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombeo Mecánico  
Resp:

3.- Que fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombeo Electrosumergible  
Resp:

4.- Que fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bomba de Cavidad Progresiva  
Resp:

5.- Que fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Bombeo Hidráulico  
Resp:

6.- Que fortalezas presenta la aplicación del Sistema de Levantamiento Artificial por Gas  
Resp:

7.- Que debilidades tiene el uso del Sistema de Bombeo Mecánico  
Resp:

8.- Que debilidades tiene el uso del Sistema de Bombeo Electrosumergible  
Resp:

9.- Que debilidades tiene el uso del Sistema de Bombas de Cavidad Progresiva  
Resp:

10.- Que debilidades tiene el uso del Sistema de Bombeo Hidráulico  
Resp:

11.- Que debilidades tiene el uso del Sistema de Levantamiento Artificial por Gas  
Resp:

13.- Es la Matriz de Evaluación Tecnológica una metodología apropiada para la selección de los Sistemas de Levantamiento Artificial

SI NO NO LO CONOCE

14.- Es Sistema Experto de Levantamiento Artificial una metodología apropiada para la selección de los Métodos de Levantamiento Artificial

SI NO NO LO CONOCE

15.- Es la Metodología de selección Óptima de Levantamiento Artificial un procedimiento apropiado para la selección de los Métodos de Levantamiento Artificial

SI NO NO LO CONOCE

## Cuestionario No. 2

### CUESTIONARIO PARA DETERMINAR LOS PESOS DE LOS CRITERIOS

#### Escala de Valoración: Saaty

VALOR DE $a_{ij}$	INTERPRETACIÓN
1	Los criterios de i y j tienen igual importancia
3	El criterio i es ligeramente más importante que el criterio j
5	La experiencia y la apreciación indican que el criterio i es mucho más importante que el criterio j
7	El criterio i es muy importante, o se puede demostrar que es más importante que el criterio j
9	El criterio i es absolutamente más importante que el criterio j
2, 4, 6, 8	Valores intermedios o compromisos recíprocos para comparación inversa

**Método a Evaluar: Bombeo Mecánico**

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz.

	Índice de Productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas/Líquido	Profundidad	Presión Estática	Gravedad API	Arenamiento del Pozo	Diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Desviación del Hoyo	Comportamiento de Afluencia	Producción de Parafinas y Asfaltenos	Acumulación de Escamas	Problemas de Corrosión
Índice de Productividad	1													
Tasa de Líquido		1												
Relación Gas/Líquido			1											
Profundidad				1										
Presión Estática					1									
Gravedad API						1								
Arenamiento del Pozo							1							
Diámetro del Revestidor								1						
Diámetro del Eductor									1					
Desviación del Hoyo										1				
Comportamiento de Afluencia											1			
Producción de Parafinas y												1		
Acumulación de Escamas													1	
Problemas de Corrosión														1

## Método a Evaluar: Bombeo Electrosomergible

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz

	Índice de Productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas/Líquido	Profundidad	Pres & Ecstatic	Gravedad API	Temperatura	Arenamiento del Pozo	Mechanism de Production	Fuentes de Energía	Plataforma de Producción	Diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Desviación del Hoyo	Comportamiento de Afluencia	Producción de Parafinas y asfaltenos	Acumulacion de Escamas	Problemas de Corrosion
Índice de Productividad	1																	
Tasa de Líquido		1																
Relación Gas/Líquido			1															
Profundidad				1														
Presión Estática					1													
Gravedad API						1												
Temperatura							1											
Arenamiento del Pozo								1										
Mecanismo de Producción									1									
Fuentes de Energía										1								
Plataforma de Producción											1							
Diámetro del Revestidor												1						
Diámetro del Eductor													1					
Desviación del Hoyo														1				
Comportamiento de Afluencia															1			
Producción de Parafinas y asfaltenos																1		
Acumulación de Escamas																	1	
Problemas de Corrosión																		1

## Método a Evaluar: Bomba de Cavidad Progresiva

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz.

	Índice de Productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas/Líquido	Profundidad	Presión Estática	Gravedad API	Temperatura	Arenamiento del Pozo	Fuentes de Energía	Plataforma de Producción	Diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Desviación del Hoyo	Comportamiento de Afluencia	Producción de Parafinas y Asfáltenos	Acumulación de Escamas	Problemas de Corrosión
Índice de Productividad	1																
Tasa de Líquido		1															
Relación Gas/Líquido			1														
Profundidad				1													
Presión Estática					1												
Gravedad API						1											
Temperatura							1										
Arenamiento del Pozo								1									
Fuentes de Energía									1								
Plataforma de Producción										1							
Diámetro del Revestidor											1						
Diámetro del Eductor												1					
Desviación del Hoyo													1				
Comportamiento de Afluencia														1			
Producción de Parafinas y Asfáltenos															1		
Acumulación de Escamas																1	
Problemas de Corrosión																	1

### Método a Evaluar: Bombeo Hidráulico

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz.

	Índice de Productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas/Líquido	Profundidad	Presión Estática	Gravedad API	Arenamiento del Pozo	Diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Desviación del Hoyo	Comportamiento de Afluencia	Producción de Parafinas y Asfaltenos	Acumulación de Escamas	Problemas de Corrosión
Índice de Productividad	1													
Tasa de Líquido		1												
Relación Gas/Líquido			1											
Profundidad				1										
Presión Estática					1									
Gravedad API						1								
Arenamiento del Pozo							1							
Diámetro del Revestidor								1						
Diámetro del Eductor									1					
Desviación del Hoyo										1				
Comportamiento de Afluencia											1			
Producción de Parafinas y												1		
Acumulación de Escamas													1	
Problemas de Corrosión														1

**Método a Evaluar:** Levantamiento Artificial por Gas

De acuerdo a la tabla de valoración realice la comparación entre los pares de criterios que se muestran en la matriz.

	Índice de Productividad	Tasa de Líquido	Relación Gas/Líquido	Profundidad	Presión Estática	Gravedad API	Diámetro del Revestidor	Diámetro del Eductor	Comportamiento de Afluencia	Producción de Parafinas y Asfaltenos	Problemas de Corrosión
Índice de Productividad	1										
Tasa de Líquido		1									
Relación Gas/Líquido			1								
Profundidad				1							
Presión Estática					1						
Gravedad API						1					
Diámetro del Revestidor							1				
Diámetro del Eductor								1			
Comportamiento de Afluencia y asfaltenos									1		
Producción de Parafinas y										1	
Problemas de Corrosión											1

### Cuestionario No. 3

#### CUESTIONARIO PARA DETERMINAR LA FUNCIÓN ESCALÓN PARA LAS CURVAS DE VALORACIÓN

#### Escala de Calificación: Silva

Valor	Definición	Significado
9	Excelente	La unidad de decisión no percibe razones para afirmar que el intervalo prototipo y el intervalo a calificar difieren en algo, por lo que su grado de similitud es el más elevado posible.
7	Muy Bueno	La unidad de decisión percibe muchas razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar son semejantes, pero también percibe algunas diferencias, por lo que su grado de similitud es alto.
5	Bueno	La unidad de decisión percibe tantas razones de semejanza como de diferencias entre el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar por lo que su grado de similitud es medio.
3	Regular	La unidad de decisión percibe muchas razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar son distintos pero también perciben alguna semejanza, por lo que su grado de similitud es bajo.
1	Malo	La unidad de decisión no percibe razones para afirmar que el valor del intervalo prototipo y el del intervalo a calificar se parecen en algo, por lo que su grado de similitud es el más bajo posible.
2, 4, 6, 8	Grado intermedio entre valores adyacentes	Estos valores se utilizan cuando se requiere un compromiso entre las situaciones descritas para valores adyacentes en la escala.

**Método a Evaluar:** Bombeo Mecánico

Cual considera Ud. que es el intervalo en que el criterio se comporta de manera ideal para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre **el intervalo ideal** y **el intervalo a calificar** según la escala.

Índice de Productividad	Intervalo ideal:	
F(IP)	$0,1 \leq IP < 0,5$	
	$0,5 \leq IP < 1$	
	$1 \leq IP < 1,5$	
	$1,5 \leq IP < 2$	
	$2 \leq IP < 2,5$	
	$2,5 \leq IP < 3$	
	$3 \leq IP < 3,5$	
	$IP > 3,5$	

Tasa de Líquido	Intervalo ideal:	
F(q)	$q < 100$	
	$100 \leq q < 200$	
	$200 \leq q < 300$	
	$300 \leq q < 400$	
	$400 \leq q < 500$	
	$500 \leq q < 600$	
	$600 \leq q < 700$	
	$700 \leq q < 800$	
	$q > 800$	

Relación Gas Líquido	Intervalo ideal:	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 70$	
	$70 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 120$	
	$120 \leq RGL < 150$	
	$150 \leq RGL < 180$	
	$RGL > 180$	

Profundidad al tope de las perf.	Intervalo ideal:	
F(D)	$D < 3000$	
	$3000 \leq D < 3500$	
	$3500 \leq D < 3800$	
	$3800 \leq D < 4200$	
	$4200 \leq D < 5000$	
	$D > 5000$	

Presión estática del yacimiento	Intervalo ideal:	
F(Pe)	$Pe < 500$	
	$500 \leq Pe < 600$	
	$600 \leq Pe < 700$	
	$700 \leq Pe < 800$	
	$800 \leq Pe < 1000$	
	$1000 \leq Pe < 1500$	
	$1500 \leq Pe < 3000$	
	$3000 \leq Pe < 6000$	
	$Pe > 6000$	

Gravedad API	Intervalo ideal:	
F(API)	$API < 8$	
	$8 \leq API < 10$	
	$10 \leq API < 12$	
	$12 \leq API < 14$	
	$16 \leq API < 20$	
	$20 \leq API < 24$	
	$24 \leq API < 28$	
	$API > 28$	

Grado de Desviación del Pozo	Intervalo ideal:	
	$0 \leq Grd < 15$	
	$15 \leq Grd < 30$	
	$30 \leq Grd < 45$	
	$45 \leq Grd < 60$	
	$Grd > 60$	

Diámetro de Tubería (Revestidor)	Intervalo ideal:	
F(DR)	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	$DR > 7$	

Diámetro de Tubería (Eductor)	Intervalo ideal:	
F(DE)	$2\frac{3}{8} \leq DE < 2\frac{7}{8}$	
	$2\frac{7}{8} \leq DE < 3\frac{1}{2}$	
	$3\frac{1}{2} \leq DE < 4\frac{1}{2}$	
	$4\frac{1}{2} \leq DE < 5\frac{1}{2}$	
	$DE > 5\frac{1}{2}$	

**Método a Evaluar: Bombeo Electrosumergible**

Cual considera Ud. que es el intervalo en que el criterio se comporta de manera ideal para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre el **intervalo ideal** y el **intervalo a calificar** según la escala.

Índice de Productividad	Intervalo ideal:	
F(IP)	$1 \leq IP < 3$	
	$3 \leq IP < 5$	
	$5 \leq IP < 8$	
	$8 \leq IP < 12$	
	$12 \leq IP < 18$	
	$18 \leq IP < 24$	
	$24 \leq IP < 30$	
	$30 \leq IP < 40$	
	$IP > 40$	

Tasa de Líquido	Intervalo ideal:	
F(q)	$q < 300$	
	$300 \leq q < 400$	
	$400 \leq q < 600$	
	$600 \leq q < 1000$	
	$1000 \leq q < 2000$	
	$2000 \leq q < 3000$	
	$3000 \leq q < 4000$	
	$4000 \leq q < 5000$	
	$5000 \leq q < 20000$	
	$q > 20000$	

Relación Gas Líquido	Intervalo ideal:	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 150$	
	$150 \leq RGL < 200$	
	$200 \leq RGL < 250$	
	$250 \leq RGL < 300$	
	$300 \leq RGL < 400$	
		$RGL > 4000$

Profundidad al tope de las perf.	Intervalo ideal:	
F(D)	$D < 8000$	
	$8000 \leq D < 9000$	
	$9000 \leq D < 10000$	
	$10000 \leq D < 12000$	
	$12000 \leq D < 14000$	
	$14000 \leq D < 15000$	
	$D > 15000$	

Presión estática del yacimiento	Intervalo ideal:	
F(Pe)	$Pe < 1500$	
	$1500 \leq Pe < 2000$	
	$2000 \leq Pe < 2200$	
	$2200 \leq Pe < 2500$	
	$2500 \leq Pe < 3000$	
	$3000 \leq Pe < 3500$	
	$3500 \leq Pe < 4000$	
	$4000 \leq Pe < 5000$	
	$Pe > 5000$	

Gravedad API	Intervalo ideal:	
F(API)	$API < 12$	
	$12 \leq API < 15$	
	$15 \leq API < 18$	
	$18 \leq API < 22$	
	$22 \leq API < 26$	
	$26 \leq API < 30$	
	$30 \leq API < 35$	
	$API > 35$	

Temperatura al tope de la form.	Intervalo ideal:	
F(T)	$60 \leq T < 90$	
	$90 \leq T < 120$	
	$120 \leq T < 150$	
	$150 \leq T < 160$	
	$160 \leq T < 170$	
	$170 \leq T < 180$	
	$200 \leq T < 250$	
	$T > 250$	

Grado de Desviación del Pozo	Intervalo ideal:	
F(Grd)	$0 \leq Grd < 15$	
	$15 \leq Grd < 30$	
	$30 \leq Grd < 45$	
	$45 \leq Grd < 60$	
	$Grd > 60$	

Diámetro de Tubería (Revestidor)	Intervalo ideal:	
F(DR)	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	$DR > 7$	

Diámetro de Tubería (Eductor)	Intervalo ideal:	
F(DE)	$23/8 \leq DE < 27/8$	
	$27/8 \leq DE < 1/2$	
	$31/2 \leq DE < 41/2$	
	$41/2 \leq DE < 51/2$	
	$DE > 51/2$	

**Método a Evaluar:** Bomba de Cavidad Progresiva

Cual considera Ud. que es el intervalo en que el criterio se comporta de manera ideal para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre **el intervalo ideal** y el **intervalo a calificar** según la escala.

Índice de Productividad	Intervalo ideal:	
F(IP)	$0,1 \leq IP < 0,5$	
	$0,5 \leq IP < 0,8$	
	$0,8 \leq IP < 1$	
	$1 \leq IP < 1,5$	
	$1,5 \leq IP < 2$	
	$2 \leq IP < 2,5$	
	$2,5 \leq IP < 3$	
	$IP > 3$	

Tasa de Líquido	Intervalo ideal:	
F(q)	$q < 30$	
	$30 \leq q < 50$	
	$50 \leq q < 80$	
	$80 \leq q < 100$	
	$100 \leq q < 200$	
	$200 \leq q < 300$	
	$300 \leq q < 500$	
	$500 \leq q < 1000$	
	$1000 \leq q < 2500$	
	$q > 2500$	

Relación Gas Líquido	Intervalo ideal:	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 60$	
	$60 \leq RGL < 70$	
	$70 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 120$	
	$120 \leq RGL < 180$	
	$180 \leq RGL < 200$	

Profundidad al tope de las perf.	Intervalo ideal:	
F(D)	$D < 3000$	
	$3000 \leq D < 3500$	
	$3500 \leq D < 3800$	
	$3800 \leq D < 4000$	
	$4000 \leq D < 4500$	
	$4500 \leq D < 7000$	
	$D > 7000$	

Presión estática del yacimiento	Intervalo ideal:	
F(Pe)	Pe <600	
	600 ≤ Pe <1000	
	1000 ≤ Pe <1300	
	1300 ≤ Pe <1500	
	1500 ≤ Pe <1700	
	1700 ≤ Pe <2000	
	2000 ≤ Pe <2200	
	2200 ≤ Pe <2500	
Pe >2500		

Gravedad API	Intervalo ideal:	
F(API)	API <8	
	8 ≤ API <10	
	10 ≤ API <12	
	12 ≤ API <15	
	15 ≤ API <20	
	20 ≤ API <24	
	24 ≤ API <28	
	28 ≤ API <30	
API >30		

Temperatura al tope de la form.	Intervalo ideal:	
F(T)	T <80	
	80 ≤ T <90	
	90 ≤ T <100	
	100 ≤ T <120	
	120 ≤ T <140	
	140 ≤ T <160	
	160 ≤ T <180	
	180 ≤ T <200	
T >200		

Grado de Desviación del Pozo	Intervalo ideal:	
F(Grd)	0 ≤ Grd <	15
	15 ≤ Grd <	30
	30 ≤ Grd <	45
	45 ≤ Grd <	60
	Grd >	60

Diámetro de Tubería (Revestidor)	Intervalo ideal:	
F(DR)	4,5 ≤ DR <	5,5
	5,5 ≤ DR <	7
	7 ≤ DR <	9 <sup>5/8</sup>
	DR >	9 <sup>5/8</sup>

**Método a Evaluar:** Bombeo Hidráulico

Cual considera Ud. que es el intervalo en que el criterio se comporta de manera ideal para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre el **intervalo ideal** y el **intervalo a calificar** según la escala.

Índice de Productividad	Intervalo ideal:	
F(IP)	$5 \leq IP < 6$	
	$6 \leq IP < 7$	
	$7 \leq IP < 10$	
	$10 \leq IP < 15$	
	$15 \leq IP < 20$	
	$20 \leq IP < 30$	
	$30 \leq IP < 40$	
	$40 \leq IP < 50$	
	$IP > 50$	

Tasa de Líquido	Intervalo ideal:	
F(q)	$q < 1000$	
	$1000 \leq q < 2000$	
	$2000 \leq q < 3000$	
	$3000 \leq q < 4000$	
	$4000 \leq q < 5000$	
	$5000 \leq q < 6000$	
	$6000 \leq q < 8000$	
	$8000 \leq q < 10000$	
	$10000 \leq q < 20000$	
	$20000 \leq q < 30000$	
	$q > 30000$	

Relación Gas Líquido	Intervalo ideal:	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 50$	
	$50 \leq RGL < 100$	
	$100 \leq RGL < 150$	
	$150 \leq RGL < 200$	
	$200 \leq RGL < 250$	
	$250 \leq RGL < 300$	
	$300 \leq RGL < 400$	

Profundidad al tope de las perf.	Intervalo ideal:	
F(D)	$D < 5000$	
	$5000 \leq D < 6000$	
	$6000 \leq D < 7000$	
	$7000 \leq D < 8000$	
	$8000 \leq D < 9000$	
	$9000 \leq D < 10000$	
	$D > 10000$	

Presión estática del yacimiento	Intervalo ideal:	
F(Pe)	$Pe < 2000$	
	$2000 \leq Pe < 2500$	
	$2500 \leq Pe < 3000$	
	$3000 \leq Pe < 3500$	
	$3500 \leq Pe < 4000$	
	$4000 \leq Pe < 4500$	
	$4500 \leq Pe < 5000$	
	$5000 \leq Pe < 5500$	
	$Pe > 5500$	

Gravedad API	Intervalo ideal:	
F(API)	$API < 15$	
	$15 \leq API < 18$	
	$18 \leq API < 21$	
	$21 \leq API < 24$	
	$24 \leq API < 27$	
	$27 \leq API < 30$	
	$30 \leq API < 32$	
	$API > 32$	

Grado de Desviación del Pozo	Intervalo ideal:	
F(Grd)	$0 \leq Grd < 15$	
	$15 \leq Grd < 30$	
	$30 \leq Grd < 45$	
	$45 \leq Grd < 60$	
	$Grd > 60$	

Diámetro de Tubería (Revestidor)	Intervalo ideal:	
F(DR)	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	$DR > 7$	

Diámetro de Tubería (Eductor)	Intervalo ideal:	
F(DE)	$2\frac{3}{8} \leq DE < 2\frac{7}{8}$	
	$2\frac{7}{8} \leq DE < 3\frac{1}{2}$	
	$3\frac{1}{2} \leq DE < 4\frac{1}{2}$	
	$4\frac{1}{2} \leq DE < 5\frac{1}{2}$	
	$DE > 5\frac{1}{2}$	

**Método a Evaluar:** Levantamiento Artificial por Gas

Cual considera Ud. que es el intervalo en que el criterio se comporta de manera ideal para el método en cuestión e indique en la casilla correspondiente el valor del grado de similitud entre el **intervalo ideal** y el **intervalo a calificar** según la escala.

Índice de Productividad	Intervalo ideal:	
F(IP)	$0 \leq IP < 0,25$	
	$0,25 \leq IP < 1$	
	$1 \leq IP < 2$	
	$2 \leq IP < 2,5$	
	$2,5 \leq IP < 3$	
	$3 \leq IP < 3,5$	
	$3,5 \leq IP < 4,0$	
	$4,0 \leq IP < 5$	
	$IP > 5$	

Tasa de Líquido	Intervalo ideal:	
F(q)	$q < 30$	
	$30 \leq q < 40$	
	$40 \leq q < 50$	
	$50 \leq q < 100$	
	$100 \leq q < 300$	
	$300 \leq q < 400$	
	$400 \leq q < 800$	
	$800 \leq q < 1000$	
	$1000 \leq q < 1500$	
	$1500 \leq q < 2000$	
	$q > 2000$	

Relación Gas Líquido	Intervalo ideal:	
F(RGL)	$0 \leq RGL < 200$	
	$200 \leq RGL < 300$	
	$300 \leq RGL < 400$	
	$400 \leq RGL < 500$	
	$500 \leq RGL < 700$	
	$700 \leq RGL < 1000$	
	$1000 \leq RGL < 2000$	
	$2000 \leq RGL < 3000$	
	$RGL > 3000$	

Profundidad al tope de las perf.	Intervalo ideal:	
F(D)	$D < 3000$	
	$3000 \leq D < 3500$	
	$3500 \leq D < 4000$	
	$4000 \leq D < 4500$	
	$5000 \leq D < 5500$	
	$5500 \leq D < 6000$	
	$D > 6000$	

Presión estática del yacimiento	Intervalo ideal:	
F(Pe)	$Pe < 500$	
	$500 \leq Pe < 600$	
	$600 \leq Pe < 800$	
	$800 \leq Pe < 900$	
	$900 \leq Pe < 1000$	
	$1000 \leq Pe < 1200$	
	$1500 \leq Pe < 1500$	
	$2000 \leq Pe < 2000$	
	$Pe > 2000$	

Gravedad API	Intervalo ideal:	
F(API)	$API < 18$	
	$18 \leq API < 20$	
	$20 \leq API < 24$	
	$24 \leq API < 28$	
	$28 \leq API < 32$	
	$32 \leq API < 36$	
	$36 \leq API < 40$	
	$40 \leq API < 46$	
	$API > 46$	

Grado de Desviación del Pozo	Intervalo ideal:	
F(Grd)	$0 \leq Grd < 15$	
	$15 \leq Grd < 30$	
	$30 \leq Grd < 45$	
	$45 \leq Grd < 60$	
	$Grd > 60$	

Diámetro de Tubería (Revestidor)	Intervalo ideal:	
F(DR)	$4,5 \leq DR < 5,5$	
	$5,5 \leq DR < 7$	
	$DR > 7$	

Diámetro de Tubería (Eductor)	Intervalo ideal:	
F(DE)	$2\frac{3}{8} \leq DE < 2\frac{7}{8}$	
	$2\frac{7}{8} \leq DE < 3\frac{1}{2}$	
	$3\frac{1}{2} \leq DE < 4\frac{1}{2}$	
	$4\frac{1}{2} \leq DE < 5\frac{1}{2}$	
	$DE > 5\frac{1}{2}$	

## **APENDICE II**

DATOS OBTENIDOS Y  
CÁLCULOS REALIZADOS