

ANALISIS ECONÓMICO DEL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE  
EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES  
DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS EN LOS POZOS  
PRODUCTORES DE CAMPO CASABE. ENFASIS EN GERENCIA Y ECONOMIA  
DE HIDROCARBUROS.

ELKIN SUÁREZ GARCÍA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERIA DE PETRÓLEOS Y GAS. ÉNFASIS EN GERENCIA  
Y ECONOMÍA DE LOS HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2020

ANALISIS ECONÓMICO DEL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE  
EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES  
DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS EN LOS POZOS  
PRODUCTORES DE CAMPO CASABE. ENFASIS EN GERENCIA Y ECONOMIA  
DE HIDROCARBUROS.

ELKIN SUÁREZ GARCÍA

Trabajo de grado para optar título de Magister en Ingeniería de Petróleos y Gas  
Énfasis en Gerencia y Economía

Director:

**MSc. FERNANDO ENRIQUE CALVETE**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICASXXX  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERIA DE PETRÓLEOS Y GAS. ÉNFASIS EN GERENCIA  
Y ECONOMÍA DE LOS HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, por brindarme la dicha de la salud, bienestar físico y espiritual.

A mi madre Rosalba y a mi padre Manuel (Q.E.P.D). Es a ustedes a quien debo toda la persona que soy. Gracias por su guía y ejemplo durante todos los años de mi vida.

A mi Esposa Gisely por su compañía, apoyo, comprensión y paciencia.

A mis hijos Sofía Alejandra, Elkin David, Sara Lucia por su comprensión y paciencia.

A mis hermanos Manuel, George, Ibeth, María y Leonardo por su lealtad y comprensión.

A mis Tíos, primos por el apoyo brindado.

A mis amigos Johan Albeiro, José Gustavo y Héctor Fabio por sus palabras de motivación

*Elkin Suárez García*

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

A FERNANDO ENRIQUE CALVETE, Ingeniero de Petróleos, Profesor de la Universidad Industrial de Santander.

A NESTOR ANTONIO GONZALEZ MALDONADO, Planeador Eléctrico en Campo Casabe de ECOPETROL S.A.

A LUIS FERNANDO SAJONERO PEÑUELA, Planeador Mecánico en Campo Casabe de ECOPETROL S.A.

A ECOPETROL S.A. por facilitar la información con la cuál fue posible desarrollar el presente trabajo.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	13
1 OBJETIVOS .....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2 MARCO DE REFERENCIA.....	16
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	16
2.2 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL .....	18
2.3 MARCO PRÁCTICO .....	22
3 MODELO ECONÓMICO DE PRODUCTIVIDAD BASADO EN LA EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS (OEE).....	31
3.1 EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS.....	32
3.2 MODELO ANÁLISIS ECONÓMICO FACTOR PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
37	
4 HISTÓRICO DE ATENCIONES REALIZADAS POR MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS DE LOS POZOS PRODUCTORES EN EL CAMPO CASABE CON EL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE .....	43
4.1 INFORMACIÓN INICIAL .....	43
4.2 HISTÓRICO EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS.....	44

4.3	HISTÓRICO DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCTIVIDAD DE HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	50
5	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS DE LOS POZOS PRODUCTORES .....	57
5.1	INFORMACIÓN INICIAL.....	57
5.2	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS.....	57
5.3	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCTIVIDAD DE HORAS-HOMBRE EN TÉRMINOS DE BARRILES DE CRUDO PRODUCIDOS Y NO PRODUCIDOS.....	62
5.4	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCTIVIDAD DE HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN FUNCIÓN DE PRODUCTIVIDAD PARCIAL.....	65
6	PROPUESTA PARA INCREMENTO PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LOS EQUIPOS DE PCP, BOMBEO MECÁNICO Y FACILIDADES ELÉCTRICAS.....	73
6.1	ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES PARETO EN LOS MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS.....	73
6.2	PROPUESTA DE PILAR DE MANTENIMIENTO PRODUCTIVO Y TOTAL EN ACTIVIDADES PARETO.....	75
6.3	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROPUESTA.....	86
7	CONCLUSIONES .....	90
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	ANEXOS.....	96

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Actividades Improductivas en Mantenimientos Preventivos	35
Tabla 2. Información Inicial Modelo OEE	44
Tabla 3. Cálculo de Tiempo Disponible de Equipo	45
Tabla 4. Cálculo de Tiempo Operativo de Equipo (2017-2018)	45
Tabla 5. Cálculo Razón Disponibilidad Equipo (2017-2018)	45
Tabla 6. Cálculo de Tiempo Operativo de Equipo (2019)	46
Tabla 7. Cálculo Razón Disponibilidad Equipo (2019)	46
Tabla 8. Cálculo Tiempo de Ciclo	47
Tabla 9. Cálculo Producción Real (Barriles) 2017-2018	47
Tabla 10. Cálculo Índice de Rendimiento 2017-2018	48
Tabla 11. Cálculo Producción Real (Barriles) 2019	48
Tabla 12. Cálculo Índice de Rendimiento 2019	48
Tabla 13. Cálculo Índice de Calidad 2017-2018	49
Tabla 14. Cálculo Índice de Calidad 2019	49
Tabla 15. Cálculo Efectividad Global del Equipo OEE 2017-2018	50
Tabla 16. Cálculo Efectividad Global del Equipo OEE 2019	50
Tabla 17. Cálculo Barriles No Producidos (2017-2018)	51
Tabla 18. Cálculo Barriles No Producidos (2019)	51
Tabla 19. Cálculo Ingresos Operacionales No Percibidos (2017-2018)	52
Tabla 20. Cálculo Ingresos Operacionales No Percibidos (2019)	52
Tabla 21. Barriles No Producidos – Productividad Mano de obra (2017-2018)	53
Tabla 22. Barriles No Producidos - Productividad (2019)	53
Tabla 23. Cálculo Ingresos Operacionales (2017-2018)	54

Tabla 24. Cálculo Ingresos Operacionales (2019)	54
Tabla 25. Productividad Parcial 1 (Ingresos/Trabajador)	54
Tabla 26. Productividad Parcial 2 (Ingresos/HH)	55
Tabla 27. Productividad Parcial 2 (Ingresos/HH)	55
Tabla 28. Variación productividad Horas-hombres en Mantenimiento Preventivo	56
Tabla 29. Variación en la Efectividad Global de los Equipos	58
Tabla 30. Variación Disponibilidad Equipo	59
Tabla 31. Variación Rendimiento Equipo	60
Tabla 32. Costo Horas-hombre en Mantenimiento Preventivo	61
Tabla 33. Costo Horas-hombre en Actividades Improductivas Mantenimiento Preventivo	61
Tabla 34. Variación en barriles producidos	62
Tabla 35. Nuevos Ingresos Operacionales COP por Mejoramiento Mantenimiento Preventivo	63
Tabla 36. Distribución de Horas-hombre Trabajadas Año 2019	74
Tabla 37. Actividades Pareto No Generadoras de Valor al Día	75
Tabla 38. Proyección de tiempo de desplazamientos	76
Tabla 39. Proyección de tiempo de Charla de Seguridad	80
Tabla 40. Proyección de tiempo de Administración Documentación	82
Tabla 41. Proyección de tiempo de Espera de Tiempo de Trabajo	84
Tabla 42. Proyección de tiempo de Apertura de Permiso de Trabajo	86
Tabla 43. Resumen de Horas-hombre en Actividades de Mantenimiento Preventivo 2019 y Proyección	87
Tabla 44. Costo Horas-hombre en Mantenimiento Preventivo 2019 y Proyección	88
Tabla 45. Barriles producidos con propuesta pilar TPM	88
Tabla 46. Ingresos operacionales con propuesta pilar TPM	89

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Modelo Económico de Productividad de las Horas-Hombre en Actividades de Mantenimiento Preventivo en Pozos.....	32
Figura 2. Resumen del Cálculo del OEE.....	33
Figura 3. Variación en Barriles No producidos.....	63
Figura 4. Variación Porcentual en Barriles No Producidos.....	64
Figura 5. Variación Productividad en Función de la Cantidad de Trabajadores.....	66
Figura 6. Variación Porcentual Productividad en Función de la Cantidad de Trabajadores	66
Figura 7. Aportes en Ingresos Operacionales por Equipo para mantenimiento.....	67
Figura 8. Variación Económica Productividad por Horas-hombre	68
Figura 9. Comparativo Productividad en Horas-hombre por Equipo para mantenimiento	68
Figura 10. Tendencia Productividad en Función de Costo de Horas-hombre.....	70
Figura 11. Rendimiento por Costo de Hora Hombre en BM	70
Figura 12. Rendimiento por Costo de Hora Hombre en FE	71
Figura 13. Rendimiento por Costo de Hora Hombre en PCP	71
Figura 14. Diagrama Pareto de las Actividades no Generadoras de Valor	74
Figura 15. Tendencia de Tiempos de Desplazamiento	76
Figura 16. Desplazamientos actividades de mantenimiento preventivo Inicial.....	77
Figura 17. Desplazamientos Permisos de Trabajo	78
Figura 18. Desplazamientos Aislamientos	79

Figura 19. Tendencia de Tiempos de Charla de Seguridad	80
Figura 20. Tendencia de Tiempos de Administración Documentación	82
Figura 21. Equipo de Trabajo para la Administración de la Organización	83
Figura 22. Tendencia de Tiempos de Espera Permiso de Trabajo	84
Figura 23. Tendencia de Tiempos de Apertura de Permisos	86

## RESUMEN

**TITULO:**ANALISIS ECONOMICO DEL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS EN LOS POZOS PRODUCTORES DE CAMPO CASABE. ENFASIS EN GERENCIA Y ECONOMIA DE HIDROCARBUROS\*

**AUTOR:** ELKIN SUÁREZ GARCÍA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** PRODUCTIVIDAD, MANTENIMIENTO PREVENTIVO, HORAS HOMBRE, EFECTIVIDAD, OEE

**DESCRIPCIÓN:** A pesar de los grandes esfuerzos de las compañías en inversión de maquinaria y equipo, sigue siendo prioritario el factor humano representando un gran costo para el sector hidrocarburo dado que se mantiene como el mejor pago del país. Dentro de las actividades que mantienen la intervención del factor humano, se tienen las de mantenimiento preventivo de los equipos de bombeo mecánico, bombas de cavidad progresiva PCP y facilidades eléctricas que requieren de una búsqueda constante de optimización para que el equipo se encuentre en operación continuamente, prolongando su vida útil y evitando los mantenimientos correctivos para alcanzar su máxima efectividad.

Es por esto que por medio del presente trabajo de grado se realiza el análisis de las horas hombre invertidas en las actividades de mantenimiento preventivo en los pozos petroleros de Campo Casabe de la Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción del Río, evaluándolas por medio de la efectividad global de los equipos (OEE) para poder identificar el tiempo improductivo del equipo y así definir estrategias para su reducción, sin afectar la calidad del mantenimiento con el objetivo de que el equipo esté el mayor tiempo posible en línea generando los barriles de petróleo que hacen más productivo el pozo.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. **MSc. Fernando Enrique Calvete.**

## SUMMARY

**TITLE:** ECONOMIC ANALYSIS OF THE MAN-HOUR PRODUCTIVITY FACTOR IN THE PREVENTIVE MAINTENANCE ACTIVITIES AT THE MECHANICAL PUMPING UNITS, PCP AND ELECTRICAL FACILITIES IN THE CASABE FIELD PRODUCTION WELLS. EMPHASIS ON HYDROCARBON MANAGEMENT AND ECONOMICS\*

**AUTHOR:** ELKIN SUÁREZ GARCÍA\*\*

**KEYWORDS:** productivity, preventive maintenance, man hours, effectiveness, OEE

### DESCRIPTION:

Despite the great efforts of the companies in investment in machinery and equipment, the human factor continues to be a priority, representing a great cost for the hydrocarbon sector since it remains the best payment in the country. Among the activities that maintain the intervention of the human factor, there are those of preventive maintenance of mechanical pumping equipment, PCP progressive cavity pumps and electrical facilities that require a constant searching of optimization so that the equipment is in continuous operation , prolonging its useful life and avoiding corrective maintenance, achieving its maximum effectiveness. That is why through this degree work, the analysis of the man hours invested in preventive maintenance activities in the Campo Casabe of the River Development and Production Operations Management, oil wells is carried out, evaluating them through the Overall Equipment Effectiveness (OEE) in order to identify equipment downtime and thus define strategies for its reduction, without affecting the quality of maintenance in order for the equipment to be on line for as long as possible generating the oil barrels that make the well more productivity

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Physical-Chemical Engineering Faculty. School of Petroleum Engineering. Director MSc.  
FERNANDO ENRIQUE CALVETE GONZÁLEZ

## INTRODUCCIÓN

Casabe es un campo maduro ubicado en el Valle Medio del Río Magdalena en el departamento de Antioquia, Colombia. El Campo fue descubierto en 1941 con el pozo CB-1, de la compañía Shell de Colombia, pero su explotación comercial se inició en junio de 1945, logrando su desarrollo completo en 1958, después de haber perforado 448 pozos, de los cuales 10 resultaron secos. Cuenta con una producción cercana a los 14.000 barriles de petróleo por día.

En la actualidad se está buscando una estrategia para disminuir los tiempos no productivos en la ejecución de las actividades de mantenimiento preventivo de las facilidades de superficie instalados en los pozos productores (unidades de bombeo, variadores, motores, acometidas eléctricas). Se requiere aumentar el factor de productividad horas-hombre en las actividades de mantenimiento, teniendo en cuenta que la productividad se ha considerado como el concepto clave para determinar si una empresa o un sector industrial son capaces de competir en los mercados globalizados. Uno de los propósitos más intensos para mejorar productividad se consigue midiéndola, para tener datos de su comportamiento y así tomar las acciones.

El uso del análisis económico del factor de productividad horas-hombre permitirá revisar el grado de eficiencia, cualitativa y cuantitativa del equipo productivo. Con el desarrollo del análisis económico del factor de productividad horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo en campo Casabe, se tendrá un efecto positivo, existen evidencias claras de que una mejora de la productividad es clave para producir valor económico.

Lo que se persigue con este análisis es conocer que variables y efectos favorecen y afectan al incremento del factor de productividad para que redunde en beneficios

económicos para la empresa y que pueda ser replicado en otros campos de la empresa.

# 1 OBJETIVOS

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Realizar un modelo de análisis económico del factor de productividad horas-hombre en las actividades de ejecución de mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas de los pozos productores de Campo Casabe.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Definir el modelo de análisis económico que se utilizará para revisar el factor de productividad horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas de los pozos productores.
- ✓ Alimentar el modelo con el histórico de atenciones realizadas por mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas de los pozos productores en el campo Casabe con el factor de productividad horas-hombre correspondiente, utilizando la información existente en los últimos 2 años.
- ✓ Efectuar el análisis económico del factor de productividad horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas de los pozos productores.
- ✓ Elaborar una propuesta que permita incrementar el factor de productividad horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y sus facilidades eléctricas en los pozos productores.

## 2 MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

#### **Análisis Económico**

Una definición índica que es un método para separar, examinar y evaluar tanto cuantitativa como cualitativamente, las interrelaciones que se dan entre los distintos agentes económicos, así como los fenómenos y situaciones que de ella se derivan; tanto al interior de la economía, como en su relación con el exterior.

A continuación, se describen algunos de los aportes más representativos reportados en la literatura, relacionados con análisis económico.

Schumpeter, Joseph A (1971) concebía la economía como una ciencia humana y este lúcido e inteligente texto refleja esa misma percepción, lo que la convierte en una de las obras fundamentales de la historia de la economía.<sup>1</sup>

FH Miniño (1994), afirmó que el análisis económico es una herramienta muy importante aplicable a cualquier sistema productivo<sup>2</sup>.

#### **Productividad**

---

<sup>1</sup> SCHUMPETER, J. A, et al. Historia del análisis económico. Barcelona: Ariel, 1971.

<sup>2</sup> HERRERA, Fabio, et al. Fundamentos de análisis económico: guía para investigación y extensión rural. Costa Rica: Bib. Orton IICA/CATIE, 1994. No. 232.

A continuación, se describen algunos de los aportes más representativos reportados en la literatura, relacionados con productividad.

D. Bain (1985), afirmó que el concepto de productividad implica la interacción entre los distintos factores del lugar de trabajo. Mientras que la producción o resultados logrados pueden estar relacionados con muchos insumos o recursos diferentes, en forma de distintas relaciones de productividad<sup>3</sup>.

J Prokopenko (1989). Definió la productividad como la relación entre la producción obtenida por un sistema de producción o servicios y los recursos utilizados para obtenerla. Así pues, la productividad se define como el uso eficiente de recursos de trabajo, capital, tierra, materiales, energía, información en la producción de diversos bienes y servicios.<sup>4</sup>

MM. Cequea Null, C Rodríguez Monroy (2012). Aseveró que las personas se asocian, colaboran e interactúan para el logro de sus metas y los de la organización. Son las personas las que le otorgan 'vida' a las organizaciones. Asimismo, este hecho asociativo genera procesos psicológicos y psicosociales que afectan a los individuos, a los grupos y a los resultados de la organización. El conocimiento de estos procesos es de suma importancia para quienes dirigen las organizaciones, ya que su adecuada gestión permitirá obtener los resultados deseados. A fin de establecer los factores humanos que inciden en la productividad, se realizó un análisis factorial donde se obtuvieron cuatro

---

<sup>3</sup> BAIN, D. Productividad: la solución a los problemas de la empresa (No. HD56. B34 1992.). México, DF: McGraw-Hill, 1985.

<sup>4</sup> PROKOPENKO, J. La gestión de la productividad. Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo, 1989.

componentes, lo que permitió clasificarlos en cuatro factores: individual, grupal, organizacional y de resultados<sup>5</sup>.

## **2.2 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL**

Se hará una breve descripción de la evolución del mantenimiento teniendo en cuenta el área de producción, debido a la interrelación que hay entre estas dos áreas con el fin de comprender más claramente porque las técnicas y metodologías desarrolladas en mantenimiento dan respuesta a las necesidades de hoy y se consideran están a la vanguardia. Para lo anterior se hará una descripción por generaciones hasta llegar a la gestión de activos<sup>6</sup>.

En la primera generación se encuentra que, siendo las máquinas relativamente sencillas, lentas y grandes, el mantenimiento se dedicaba solamente a hacer reparaciones cuando los equipos fallaban, y usualmente esto lo podía hacer el mismo operario, debido a que era también sencillo efectuar su reparación, esto era un mantenimiento enteramente correctivo, y los paros de la maquinaria no tenían un alto impacto en producción.

En la segunda generación, debido a la aparición de la producción en serie, la maquinaria tenía una mayor sofisticación con el fin de dar respuesta a la demanda que se requería de los sistemas productivos, así mismo se requiere que los equipos tengan una mayor disponibilidad, lo cual hace que las empresas tengan unos departamentos dedicados a mantenimiento con personal específico. Dado que los paros de la maquinaria tenían un alto impacto en la producción, nace el concepto de mantenimiento preventivo con el fin de minimizar las paradas de planta.

---

<sup>5</sup> CEQUEA NULL, M. M y RODRÍGUEZ MONROY, C. Productividad y factores humanos. Un modelo con ecuaciones estructurales. En: *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*. Febrero 2012. vol. 37 no 2,. p. 121-127.

<sup>6</sup> MORA A. Mantenimiento industrial efectivo. Envigado: Editorila Cold i, 2014. p 26 - 44.

En la tercera generación debido a la crisis industrial de los años 80 y a la crisis energética del 73 aparecen nuevas corrientes de mantenimiento encaminadas al aumento de la confiabilidad de la maquinaria, para poder optimizar la producción. Es así que las empresas alcanzan un desarrollo organizacional en cuanto a las acciones del mantenimiento, estructurándolas secuencial y lógicamente con el fin de gestionar el mantenimiento de forma efectiva, a esto se le conoce como organización táctica del mantenimiento y se da la aparición del mantenimiento por condición, TPM y RCM, sistemas informáticos (GMAO) entre otros.

En la cuarta generación, una vez las empresas han pasado por las etapas anteriores, desarrollando programas de mantenimiento preventivo y programas como el TPM o RCM, requieren medir sus resultados e identificar hasta qué nivel de excelencia han alcanzado, lo anterior teniendo en cuenta los altos niveles de competitividad que exige el medio, para lo anterior han desarrollado sistemas de costeo, crean sistemas de medición bajo parámetros propios e internacionales y se han comparado con otras organizaciones, entre otras prácticas. La aplicación de todas estas corrientes de gestión da como resultado la terotecnología que se define como el estudio y gestión de la vida de un activo, desde su construcción, instalación y puesta en marcha en una industria hasta el final de su vida útil. Esta reúne varias ciencias como logística, administración, finanzas, ingeniería, y la gestión de la tecnología entre otros.

En la quinta generación, el enfoque de las organizaciones está en el desarrollo de habilidades y competencias, además de la especialización en alguna de las etapas anteriores y consolidación del sistema de información del mantenimiento y producción. Para lo anterior la empresa utiliza una estrategia de mantenimiento integral basada en procesos y utiliza métodos como el “balanced scored card” o

cuadro de mandos integral para poder tanto formular como controlar y gestionar la estrategia. Paralelo a esto, producción ha implementado tecnologías de punta, junto con filosofías de producción. Se destaca que las áreas de producción y mantenimiento en la empresa, trabajan en conjunto gracias al alto nivel de conocimiento y desarrollo al que ha llegado la organización.

Se llega a la sexta generación o etapa, una vez las empresas u organizaciones conjugan las mejores prácticas desarrolladas en las etapas anteriores, con el propósito de dirigir con éxito sus activos. Lo anterior se denomina gestión de activos y es el producto de la necesidad que tenían las empresas de gestionar el mantenimiento apropiadamente, para lo anterior identificaron que debían incluir el mantenimiento en el esquema general de la organización y manejarlo en iteración con las demás funciones (Pintelos y Gelders, 1992)<sup>7</sup>, es por ello que en la gestión de activos confluyen varias disciplinas y áreas como; la financiera, ingeniería, logística, operaciones etc.

En esta etapa el mantenimiento deja de ser visto como un gasto o costo a verse cómo un activo, es decir, un área que genera productos para satisfacer a los clientes internos, arrojando información y datos útiles y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de la organización.

En este nivel tanto mantenimiento como producción generan un aumento de la producción, del valor agregado, y de su demanda para conquistar cada vez más el mercado potencial, ya que de lo contrario estaría en pasivo y no estaría acorde a la definición de lo que es la gestión de activos. La gestión de activos nace a mediados de los años 90, gracias a la decisión de representantes de la industria, entes gubernamentales y organismos regulatorios ingleses con el fin de obtener

---

<sup>7</sup> PINTELOS Y GELDERS, 1992 citado por Márquez y Mora, Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos. INGEMAN, 2012. p14.20

mejores beneficios del negocio al integrar la gestión del mantenimiento con los diferentes ámbitos de la organización.

Esto va de la mano con la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida del activo físico, optimizando aspectos de diferente índole en cada ocasión, pero con una visión integradora del ciclo de vida. (Márquez). En concordancia con lo anterior la gestión de activos brinda un marco para implementar estrategias para la gestión del mantenimiento ofreciendo a las organizaciones el desarrollo de su competitividad y sustentabilidad generando valor a través de sus activos para lo anterior las estrategias de mantenimiento, deben estar articuladas con los objetivos de la organización y trabajar en forma colaborativa con las demás áreas de la organización, como lo son, operación, compras, finanzas y demás departamentos.

### **Tipos de Mantenimiento.**

Tradicionalmente, se han distinguido 5 tipos de mantenimiento, que se diferencian entre sí por el carácter de las tareas que incluyen:

**Mantenimiento Correctivo:** Es el conjunto de tareas destinadas a corregir los defectos que se van presentando en los distintos equipos y que son comunicados al departamento de mantenimiento por los usuarios de los mismos.

**Mantenimiento Preventivo:** Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las intervenciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno. Suele tener un carácter sistemático, es decir, se interviene, aunque el equipo no haya dado ningún síntoma de tener un problema.

**Mantenimiento Predictivo:** Es el que persigue conocer e informar permanentemente del estado y operatividad de las instalaciones mediante el

conocimiento de los valores de determinadas variables, representativas de tal estado y operatividad. Para aplicar este mantenimiento, es necesario identificar variables físicas (temperatura, vibración, consumo de energía, etc.) cuya variación sea indicativa de problemas que puedan estar apareciendo en el equipo. Es el tipo de mantenimiento más tecnológico, pues requiere de medios técnicos avanzados, y en ocasiones, de fuertes conocimientos matemáticos, físicos y/o técnicos.

**Mantenimiento Cero Horas (Overhaul):** Es el conjunto de tareas cuyo objetivo es revisar los equipos a intervalos programados, bien antes de que aparezca algún fallo, bien cuando la fiabilidad del equipo ha disminuido apreciablemente de manera que resulta arriesgado hacer previsiones sobre su capacidad productiva. Dicha revisión consiste en dejar el equipo a Cero horas de funcionamiento, es decir, como si el equipo fuera nuevo. En estas revisiones se sustituyen o se reparan todos los elementos sometidos a desgaste. Se pretende asegurar, con gran probabilidad un tiempo de buen funcionamiento fijado de antemano.

**Mantenimiento En Uso:** es el mantenimiento básico de un equipo realizado por los usuarios del mismo. Consiste en una serie de tareas elementales (tomas de datos, inspecciones visuales, limpieza, lubricación, reapriete de tornillos) para las que no es necesario una gran formación, sino tal solo un entrenamiento breve. Este tipo de mantenimiento es la base del TPM (“Total Productive Maintenance”, Mantenimiento Productivo Total).

## **2.3 MARCO PRÁCTICO**

### **Descripción del campo casabe**

El Campo Casabe, situado a 350 km (220 millas) al norte de Bogotá en medio de la Cuenca del Valle Medio del Río Magdalena del departamento de Antioquia en Colombia. El Campo se encontraba subsaturado cuando comenzó la producción en 1945, y durante la recuperación primaria los mecanismos de producción fueron

el agotamiento natural y el empuje de un acuífero débil. A fines de la década de 1970, concluido el período de empuje natural, el operador había obtenido un factor de recuperación primaria del 13 %. No obstante, para esa época, la declinación de la producción era significativa, habiéndose reducido a casi 5.000 bbl/d (800 m<sup>3</sup>/d). Para revertir esta tendencia, Ecopetrol S.A. (Empresa Colombiana de Petróleos S.A.) efectuó pruebas de inyección de agua durante varios años antes de establecer dos programas principales de recuperación secundaria, entre mediados y fines de la década de 1980.

Durante el período de recuperación secundaria, la existencia de complejidades estructurales, lutitas sensibles, areniscas heterogéneas y petróleos viscosos conspiró contra la efectividad del programa de inyección de agua. Si bien resultó inicialmente exitosa en cuanto al incremento de la producción, el agua inyectada irrumpió en forma prematura en los pozos de producción, un indicador de petróleo pasado por alto. La producción de arena se observó en un alto porcentaje de pozos, lo cual contribuyó a su colapso y causó la falla de los equipamientos de fondo de pozos. Las tasas de inyección de agua se redujeron gradualmente en un intento para superar estos problemas, y el proceso de inyección perdió efectividad en cuanto al mejoramiento de la recuperación de petróleos; desde 1996 en adelante, las tasas de producción declinaron entre 7% y 8% por año. Estructuralmente, el campo Casabe corresponde a un anticlinal de 8 km de largo, con un cierre en las tres direcciones, un flanco ESTE bien definido y una inclinación sur. La inclinación norte se encuentra fuera del área del Campo Casabe, en el Campo Galán. Una falla de desplazamiento de rumbo NE-SO, de alto ángulo, cierra el lado oeste de la trampa. Las fallas asociadas, perpendiculares a la falla principal, compartimentalizan el campo en ocho bloques. Las operaciones de perforación se limitan habitualmente a pozos verticales o desviados, dentro de cada bloque, debido a la intensidad del fallamiento y la compartimentalización.

A lo largo de la historia del Campo, los responsables de la planeación del desarrollo, evitaron la perforación de pozos en el área cercana a la falla oeste, debido a que los modelos de yacimientos generados a partir de los escasos datos sísmicos 2D, adquiridos por primera vez alrededor de 1940 y posteriormente en la década de 1970 y 1980, no lograron identificar adecuadamente la localización exacta de las fallas principales, incluida la falla principal de desplazamiento de rumbo. La falta de un modelo estructural más preciso produjo dos problemas fundamentales: los ingenieros de yacimientos subestimaron el OOIP y para los responsables de la planeación del programa de inyección de agua fue difícil localizar los pares inyector-productor dentro del mismo yacimiento y, en menor medida, dentro del mismo bloque de falla. Estas incertidumbres provocaron que, en el año 2004, ECOPETROL S.A y Schlumberger forjaran una alianza para revitalizar el campo Casabe y construir conjuntamente un plan de redesarrollo de componentes múltiples.

ECOPETROL S.A. cuenta con muchos años de experiencia y conocimiento del Casabe y de las medidas adoptadas para mantenerlo en producción. Y por otro lado Schlumberger provee nuevas tecnologías de campos petroleros, lo cual incluye levantamientos sísmicos, mediciones de fondo de pozo, análisis de datos y técnicas de perforación especializadas, además de conocimientos de dominios para interpretar los desafíos enfrentados.

Los objetivos clave que se establecieron en el plan de redesarrollo son: incrementar las reservas, manejar los programas de inyección de agua en forma más eficiente y abordar los problemas relacionados con los procesos de perforación, tales como la litología reactiva, los problemas asociados con los viajes de entrada y salida del pozo, la baja velocidad de penetración (ROP), el colapso y los derrumbes de los pozos, y los desafíos de las operaciones de terminación de pozos, tales como procesos de cementación pobres e incidentes de aplastamiento de la tubería de revestimiento. El abordaje de cada uno de estos elementos

requirió la colaboración estrecha entre los profesionales del operador y los especialistas técnicos de la compañía de servicio. Se realizó un análisis exhaustivo de todo el campo basado en los datos existentes y en la recolección de nuevos datos utilizando las tecnologías de última generación, tales como los levantamientos sísmicos 3D y los procesos de inversión sísmica 3D.

### **Un proceso de inyección de agua efectivo**

Cuando el Campo Casabe pasó del mecanismo de empuje natural a un programa de inyección de agua, a fines de la década de 1970, el operador optó por utilizar una malla típica de cinco pozos, con aproximadamente 500 pares de inyectoros y productores. Para el barrido de las secciones superiores e inferiores de las arenas A y B, se perforaron hasta cuatro pozos por cada localización de inyección. Durante el período inicial de inyección de agua, las tasas de inyección fueron representativas en 1986 y 1991. Estas fechas corresponden al primer y segundo año posterior al comienzo de los dos programas de inyección de agua para las áreas norte y sur del Campo Casabe. Transcurrido dos o tres años, se observó una caída notable de las tasas de inyección de agua. Esto se debió fundamentalmente a las restricciones impuestas sobre las tasas para evitar incidentes de aplastamiento de las tuberías de revestimiento.

El operador había registrado fenómenos de irrupción prematura de agua en los pozos de productores de campo durante ambos programas de inyección de agua, como resultado de la canalización del agua de inyección dentro de las capas de alta permeabilidad. Además, existía una relación de movilidad pobre en todo el campo: los petróleos viscosos (con una densidad de 14.8 a 23.3 °API en las areniscas superiores y de 15.4 a 24.8 °API en las areniscas inferiores) eran desplazados por el agua que fluía en forma más libre, y una vez producida la irrupción, el influjo de agua se incrementaba. Estas condiciones produjeron una pobre eficiencia promedio de barrido vertical, de tan solo 20%.

La producción de arena y alta velocidad de los chorros de agua arenosa a través de los disparos, erosionó significativamente las paredes de las tuberías de revestimiento y los equipamientos de fondo de pozo en los pozos productores. Durante un período crucial del programa de inyección de agua, muchos pozos colapsaron y fueron abandonados o puestos fuera de servicio. Para sustentar los niveles de producción, el operador optó por convertir muchos pozos inyectoros en pozos de producción; sin embargo, esto afectó drásticamente los esquemas de inyección de agua.

Las restricciones de las tasas de inyección para mitigar los colapsos de los pozos, fue otro de los factores que produjo una distribución no uniforme del flujo del agua. El barrido real era pobre, lo cual se tradujo en numerosas áreas de petróleo pasado por alto. El equipo de redesarrollo del campo quería restablecer las distribuciones para mejorar la eficiencia de barrido. Por consiguiente, gran parte de la tercera campaña de perforación consistió en la planeación y construcción de nuevos pozos inyectoros y productores. Estos pozos se colocaron para recrear una red de pozos distribuidos de manera uniforme por todo el campo. No obstante, el barrido real depende en gran medida de la obtención de una adecuada eficiencia del barrido vertical. Los especialistas en métodos de inyección de agua primero necesitaban diseñar mejores sistemas de control de inyección que mejoraran el barrido vertical y proveer un mecanismo para reducir los efectos perjudiciales de la canalización de agua en las sartas de producción.

La eficiencia del barrido vertical está determinada por la efectividad con que el agua que fluye desde los pozos inyectoros desplaza el petróleo a través de las capas permeables hasta los pozos productores de petróleo conectados a la formación. El diseño original de los pozos inyectoros de múltiples capas carecía de control del perfil de inyección, de modo que el agua fluía preferentemente a través de las formaciones más permeables.

Para optimizar el proceso de inyección de agua, los especialistas en manejo de la producción de agua recomendaron el empleo de sartas de inyección selectivas que utilizaban reguladores de flujo de inyección de agua. Estos diseños permitirían al operador restringir las tasas de inyección en determinadas capas, independientemente de la presión, la permeabilidad, el factor de daño o cualquier otro factor que normalmente afectaría el flujo. Cada una de las capas se aísla para evitar que cualquier fluido presente en esa zona del pozo invada otra zona. Dentro de esta sección se coloca una boquilla de inyección que se controla desde la superficie. Los nuevos diseños de sartas selectivas mejoraron la eficiencia del barrido vertical al permitir que el operador mantuviese tasas de inyección más altas en las capas menos afectadas por problemas inducidos por la inyección de agua. A la inversa, esos nuevos diseños mitigaron los problemas relacionados con la canalización al permitir una reducción de las tasas en las capas problemáticas. Además, el empleo de un solo pozo diseñado con control de flujo aislado fue mucho más efectivo desde el punto de vista de sus costos que el diseño previo que implicaba hasta cuatro pozos por localización de inyección. Ahora se han instalado 16 reguladores de flujo de agua en los pozos inyectoros del Campo Casabe. Esta solución abordó además la posibilidad de que la perforación de varios inyectoros, estrechamente espaciados entre sí, fuera una de las causas probables de los incidentes de aplastamiento de la tubería de revestimiento.

### **Pozos y resultados nuevos**

Las areniscas del Campo Casabe han sido desarrolladas extensivamente; no obstante, en los campos maduros es común descubrir petróleo en lugares inesperados. Por ejemplo, algunas zonas del Campo Casabe fueron pasadas por alto porque, utilizando las herramientas de resistividad tradicionales, es difícil detectar aquellas zonas productivas de la baja resistividad; existen herramientas alternativas que se analizan más adelante. Otras zonas resultaron inaccesibles porque la falta de datos estructurales tornaba muy alto el riesgo de perforación.

Utilizando la información estructural adquirida por la alianza, el operador está desarrollando ahora la selección de la estructura anticlinal del Campo Casabe que se encuentra en la posición estructuralmente más elevada, en las areniscas B del Bloque V.

El pozo de exploración casabe 01, ubicado y echado abajo en el flanco del anticlinal, exhibió rastros de petróleo en las areniscas delgadas de las zonas cenitales, pero estas zonas nunca habían sido probadas. Un pozo nuevo, situado echado arriba con respecto al pozo de exploración, fue propuesto para desarrollar las areniscas A. Después de revisar los nuevos datos sísmicos 3D y la longitud proyectada de la pata de petróleo, los geocientíficos revisaron la profundidad total para este pozo recién propuesto y sugirieron su profundización hasta alcanzar las areniscas B. Los datos de este pozo nuevo incluyeron la cromatografía efectuada con el lodo proveniente de las areniscas B, la cual reveló la presencia de rastros de petróleo bien definidos, y la interpretación de los registros confirmó la presencia de petróleos. Este petróleo se debe a una falta de drenaje de los pozos ubicados echados arriba.

Los datos nuevos, adquiridos con la herramienta LWD PressureXpress, indicaron que la presión del compartimiento coincidía con la presión original. La interpretación de los datos obtenidos con los registros de resonancia magnética combinable CMR-Plus confirmó la presencia del petróleo móvil. El intervalo fue terminado y el pozo produjo 211 bbl/d [34 m<sup>3</sup>/d] de petróleo sin corte de agua. Históricamente los especialistas no buscaron petróleo echado abajo en el Campo Casabe porque la formación más profunda había sido señalada como una zona de agua.

El campo deparó otra sorpresa durante un remplazo rutinario de un pozo fuera de servicio. Un pozo productor había sido dañado mecánicamente como resultado de la producción de arena inducida por la inyección de agua. Por consiguiente, se

planificó un replazo utilizando factores de diseño mejorados, recopilados exhaustivamente a partir de la investigación de los incidentes de aplastamiento de las tuberías de revestimiento. El operador perforó el pozo en las areniscas C con el fin de extraer núcleos. Antes de la perforación, estas zonas se consideraban potencialmente acuíferas, pero durante la perforación, la interpretación de los registros de lodo indicó que en estas areniscas más profundas podría haber petróleo. La interpretación de los registros no fue concluyente debido a la baja resistividad; se requería un nuevo enfoque para identificar el petróleo móvil.

La interpretación de los datos CMR-Plus indicó la presencia de petróleo móvil correspondiente a los rastros de petróleo observados en los registros de lodos. Con base en estos resultados el operador decidió someter a prueba el pozo, el cual produjo 130 bbl/d (21 m<sup>3</sup> /d) de petróleo sin corte de agua. Después de 6 meses la producción acumulada alcanza 11.000 bbl [1750 m<sup>3</sup>] sin corte de agua. Estos valores representan la existencia de reservas adicionales donde no se esperaban. Las cifras recabadas a comienzo del 2010 muestran que la alianza Casabe incrementó las tasas generales de producción en casi un 250% desde el año 2004. Esta mejora se debe en parte a un estudio por vía rápida que identificó rápidamente las causas raíces que inciden en la eficiencia de los programas de inyección en el campo y permitió descubrir reservas adicionales de petróleo utilizando datos recientemente adquiridos.

Casabe Sur, un proyecto de producción ubicado entre los campos Casabe y Peñas Blancas, nació como resultado de una sísmica 3D realizada en el año 2007, que arrojó estimaciones originales de 50 millones de barriles y unas reservas de 12 millones de barriles de petróleo. Una vez analizados los resultados de la fase exploratoria y de las pruebas realizadas en los pozos, Ecopetrol en 2011 confirma el potencial del yacimiento e inicia la etapa de producción comercial. El área comercial del campo es de 305 hectáreas y es 100% propiedad de La Nación.

El volumen original de hidrocarburos en sitio se estima en 62 millones de barriles, de los cuales se calculan unas reservas probadas de petróleo sin auditar de 5,4 millones y de 9,9 millones de barriles de reservas probables. La producción actual del campo es de 1.600 barriles de crudo por día (bpd). El plan de desarrollo contempla incrementarla hasta 5.500 bpd en 2012 con la aplicación de tecnologías de recobro secundario, especialmente la inyección de agua<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> [www.slb.com/resources/.../oilfield\\_review.aspx](http://www.slb.com/resources/.../oilfield_review.aspx). Amaya, Mauro. Ecopetrol S.A.

### 3 MODELO ECONÓMICO DE PRODUCTIVIDAD BASADO EN LA EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS (OEE)

La definición del modelo de análisis económico para revisar el factor de productividad horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas de los pozos productores, tuvo en cuenta la medición de la Efectividad Global de los Equipos, considerando que es la que permite determinar qué tan productiva fueron las horas-hombres invertidas en los mantenimientos preventivos.

Este es una medida para la productividad de los equipos propuesta por Seiichi Nakajima (finales de 1980) citado por Ben<sup>9</sup>, como una medida destinada a mostrar el grado en que el equipo está haciendo lo que se supone que debe hacer, basándose en tres factores que analizan el rendimiento del equipo que son la disponibilidad, rendimiento de lo que se produjo y calidad de lo producido.

Así se logra identificar las pérdidas de producción relacionadas con los equipos y la productividad en los mantenimientos preventivos puesto que la disponibilidad del equipo depende del tiempo que se encuentre fuera de producción siendo estas por mantenimiento u otras actividades que no generan valor, además el rendimiento se mide en función de la producción teórica del equipo si este trabajara de forma continua.

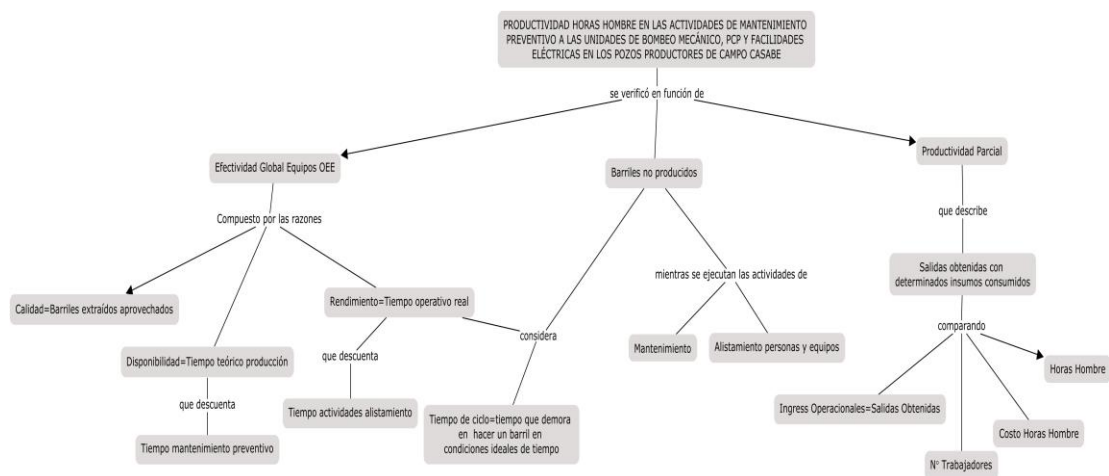
Seguido al análisis de la Efectividad Global de los Equipos, se describió el impacto económico de la productividad de las Horas-Hombre por medio de los barriles que no se producen y la productividad parcial en función de los ingresos operacionales

---

<sup>9</sup> BEN OR, Yaniv. Measuring For Improvement: A study of production processes' effectiveness and the potential for improvements at Nobel Biocare. Karlstad. 2010. p 1-128. [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:346624/FULLTEXT01.pdf>

y la inversión en horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo. La representación del modelo económico de productividad de las Horas-Hombre en las actividades de mantenimiento de las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades se muestra en la figura 1.

**Figura 1.** Modelo Económico de Productividad de las Horas-Hombre en Actividades de Mantenimiento Preventivo en Pozos



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

### 3.1 EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS

Para el cálculo de la efectividad global de los equipos se consideraron las tres razones porcentuales que se muestran en la Figura 2, que Cruelles Ruiz<sup>10</sup> las describe como:

**Disponibilidad:** Cuánto tiempo ha estado funcionando la máquina o equipo respecto del tiempo que se planificó que estuviera funcionando.

<sup>10</sup> CRUELLES RUIZ, José. La teoría de la medición del despilfarro. 2 ed. Toledo: Artef, SL, 2010. 103p.

**Rendimiento:** Durante el tiempo que ha estado funcionando, cuánto ha fabricado (bueno y malo) respecto de lo que tenía que haber fabricado a tiempo de ciclo ideal.

**Calidad:** Es el indicador más conocido por todos. Cuánto ha fabricado bueno a la primera respecto del total de la producción realizada (Bueno + Malo).

**Figura 2.** Resumen del Cálculo del OEE



Fuente: CRUELLES RUIZ, José. La teoría de la medición del despilfarro. 2 ed. Toledo: Artef, SL, 2010. 107p.

Para llegar al valor de Efectividad Global del Equipo, se debe seguir un proceso organizado de cálculo, que en este trabajo se desarrolló en cinco pasos:

- 1. Primer Paso: Disponibilidad:** la razón de disponibilidad se calcula teniendo en cuenta el tiempo que se tiene planificado para trabajar el equipo siendo este el tiempo disponible, contra el tiempo operativo que es el tiempo de funcionamiento. Para el tiempo disponible, se tiene la fórmula presentada en la Ecuación 1:

*Tiempo disponible = Horas diarias de Trabajo × Cantidad de Equipos × Días de Trabajo Ecuación 1*

Para Algarra y Sierra<sup>11</sup>, la variación entre tiempo disponible y el tiempo operativo, se da por mantenimiento preventivo, suministros de material, muestreos y demás pérdidas planificadas que requiere el equipo, información confirmada por Cruelles Ruiz<sup>12</sup>, imposibilitando que produzcan. Finalmente, para obtener el valor de la disponibilidad, se emplea la fórmula presentada en la Ecuación 2.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo Operativo del Equipo}}{\text{Tiempo disponible Equipo}} \times 100 \text{ Ecuación 2}$$

La disponibilidad se acerca al 100%, en la medida que el factor de productividad de la mano de obra implicada en los mantenimientos preventivos, **sea mayor**, asegurando que se saque el mayor provecho a los equipos.

**2. Segundo Paso: Rendimiento:** El rendimiento resulta de dividir la cantidad de piezas (barriles) realmente producidas por la cantidad de piezas (barriles) que se podrían haber producido durante el tiempo de disponibilidad del equipo, como lo describe Cruelles Ruiz<sup>13</sup>. mediante la Ecuación 3.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Tiempo de Ciclo Ideal} \times \text{N}^\circ \text{ Total Unidades}}{\text{Tiempo de operación}} \text{ Ecuación 3}$$

---

<sup>11</sup> ALGARRA, Ivonne y SIERRA, Cristian. Estudio de la efectividad global de los equipos (OEE) y propuesta de mejoramiento basada en el uso de herramientas de manufactura esbelta en la empresa Inemflex S.A.S. Trabajo de grado Profesional Ingeniería Industrial. Bogotá: Universidad Agustiana. Facultad de Ingenierías. Ingeniería Industrial, 2018. 31p

<sup>12</sup> CRUELLES RUIZ. Op. Cit ., p. 103.

<sup>13</sup> Ibid. Pág. 104

El tiempo de ciclo o la capacidad nominal, es proporcionado por el fabricante, aunque suele ser una aproximación, ya que puede variar considerablemente según las condiciones en que se opera la máquina o línea, en este caso, depende de las condiciones y características del pozo a intervenir. El tiempo de ciclo es descrito como el que tarda el equipo en procesar un elemento cuando las condiciones son óptimas y no se producen paradas innecesarias, es decir en el contexto de petróleo, los equipos tienen un tiempo estimado por cada barril que producen cuando se tienen continuidad de trabajo.

Cuando no existen datos, sugiere Cruelles Ruiz<sup>14</sup> que se elijan las mejores horas de funcionamiento, que para este caso se tomó la producción de barriles reportada para el año 2019 en el campo Casabe en los pozos que tuvieron intervenciones para mantenimientos preventivos a los equipos de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas.

El tiempo para la producción de barriles, se ve afectada por una serie de protocolos que se deben cumplir para que se pueda proceder a realizar el mantenimiento. Esto toma Horas-hombres, haciendo que el pozo se mantenga sin producir barriles, afectando la efectividad global del equipo, siendo estas las que se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Actividades Improductivas en Mantenimientos Preventivos

---

**Actividades no generadoras de valor en mantenimientos preventivos**

---

**Charla seguridad**

---

---

<sup>14</sup> Ibid. Pág. 105

<b>Administración documentación</b>
<b>Espera de materiales</b>
<b>Espera de herramienta</b>
<b>Desplazamiento</b>
<b>Espera permiso de trabajo</b>
<b>Aislamiento / des-aislamiento (SAES)</b>
<b>Custodia del equipo</b>
<b>Apertura de permisos</b>
<b>Divulgación/LECC APREN</b>
<b>Climatología adversa</b>
<b>Tiempo alistamiento</b>
<b>Orden público</b>
<b>Causa laboral/sindical</b>
<b>Desastre natural</b>

Fuente: Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**3. Tercero Paso: Calidad:** de los barriles que se producen según la unidad de bombeo, existe una proporción que no es conforme imposibilitando que se aproveche el 100% de lo producido que depende de las características del pozo, del funcionamiento del equipo, de la capacidad del equipo de extracción y características propias del crudo, entre otros factores. Cruelles Ruiz<sup>15</sup>, describe la razón de **Calidad** como las unidades producidas que fueron conformes desde la primera vez que salieron del ciclo productivo sobre el total de las unidades producidas, es decir, no se consideran las reprocesadas. Para efectos de este trabajo de grado, se trabajó con el supuesto de que los barriles que se extrajeron fueron aprovechados en su totalidad, considerando que esta razón no se asocia con la productividad de la mano de obra.

#### **4. Cuarto Paso: Efectividad Global de los Equipos (OEE)**

---

<sup>15</sup> Ibid. Pág. 104

Después de obtenidos los valores de disponibilidad, rendimiento y calidad para cada uno de los equipos, se realizó el cálculo de la efectividad global de los equipos cuyos resultados, permitieron identificar las fallas y demoras en cada uno de los procesos, en este caso los relacionados con la disponibilidad y el rendimiento pues se ve involucrada la productividad de la mano de obra en el mantenimiento preventivo.

Para el cálculo de Efectividad Global de los Equipos, se empleó la fórmula de Nakajima, presentada por Schiraldi<sup>16</sup> como la Ecuación 4

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \text{ Ecuación 4}$$

Mientras el equipo se encuentre inactivo por parte de las actividades de mantenimiento preventivo y sus actividades improductivas, afecta la productividad del equipo y del pozo, debido a que se dejan de producir ciertos barriles en un determinado periodo de tiempo, requiriendo un mayor esfuerzo para su obtención y mayor consumo de horas-hombre.

### **3.2 MODELO ANÁLISIS ECONÓMICO FACTOR PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

La mano de obra de las actividades de mantenimiento preventivo es más productiva en la medida que su intervención hace que el equipo esté el menor tiempo posible fuera de línea, para que esté generando los barriles que debería estar produciendo, es decir, si se dejan de producir barriles de petróleo es como resultado de la demora en la entrega del equipo a la línea productiva, teniendo una

---

<sup>16</sup> SCHIRALD, Massimiliano. Operations Management. 1 ed. Rijeka: Intech, 2013. 36p. ISBN 978-953-51-1013-2

relación directamente proporcional entre barriles no producidos y consumo de horas-hombre en mantenimientos preventivos, relación presentada en la siguiente expresión:

$$y \propto x$$

Siendo:

y=Barriles dejados de producir por equipo fuera de línea

x= Horas-hombre consumidas para actividades de mantenimiento;

Sí la actividad de mantenimiento requiere una cantidad considerable de tiempo, representa que es mayor la cantidad de barriles que se dejan de producir. Para poder llevar a cabo este análisis, se tuvo en cuenta la Efectividad Global del Equipo presentada en el numeral 3.1, que mientras más cerca al 100%, significa que el equipo está mayor tiempo produciendo barriles a determinado tiempo de ciclo, acercándose al nivel óptimo de producción que trae como resultado, mayores en ingresos operacionales.

Este análisis se hizo en función del Tiempo de Ciclo propuesto en el modelo de Efectividad Global de Equipos en el indicador de “Rendimiento” que es descrito por Ben<sup>17</sup> como el tiempo promedio que tarda el equipo en procesar un elemento cuando las condiciones son óptimas y no se producen paradas innecesarias, es decir en el contexto de petróleo, los equipos tienen un tiempo estimado por cada barril que producen cuando se tienen continuidad de trabajo.

---

<sup>17</sup> BEN OR, Yaniv. Measuring For Improvement: A study of production processes' effectiveness and the potential for improvements at Nobel Biocare. Karlstad. 2010.p 1-128. [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:346624/FULLTEXT01.pdf>

Dentro de las paradas necesarias y programadas, se encuentran las relacionadas a las actividades de mantenimiento preventivo que Schiraldi<sup>18</sup> las describe como aquellas que no se realizan en respuesta a la falla del sistema para reparar, sino que están destinadas a retrasar o prevenir fallas del sistema, buscando que se realicen en el menor tiempo posible para que el equipo vuelva a la línea a producir barriles de petróleo, porque de lo contrario se convierte en paradas innecesarias.

La disminución en el tiempo de intervención en los mantenimientos preventivos debe estar alineada con la calidad del mantenimiento, porque un trabajo realizado sin cumplir el objetivo que es la prolongación de la actividad del equipo, se puede convertir en un mantenimiento correctivo en que implica mayor uso de recursos como herramientas, insumos y horas-hombre, afectando el factor de productividad del pozo porque el equipo estaría mayor tiempo fuera de la línea productiva. La ecuación del tiempo de ciclo propuesta por Nakajima en 1980, la describe Cruelles Ruiz<sup>19</sup>, como se presenta en la Ecuación 5 siendo la capacidad nominal el número de unidades producidas por hora, en este caso barriles por hora (bbl/hora).

$$\textit{Tiempo de ciclo} = \frac{1}{\textit{Capacidad Nominal}} \quad \text{Ecuación 5}$$

El tiempo de ciclo representa el tiempo que se demora en producir un barril (horas/bbl), cuando no existe ninguna interferencia para su producción (mantenimiento, paradas, permisos de trabajo, alistamiento de herramientas, entre otros), se relacionó con el tiempo improductivo del pozo por el mantenimiento preventivo del equipo y las horas-hombre improductivas por las esperas y procedimientos a seguir por parte de los trabajadores (cuadrilla) para poder intervenir el equipo (Ecuación 6), obteniendo un indicador de tendencia

---

<sup>18</sup> SCHIRALD, Op. Cit ., p. 102.

<sup>19</sup> CRUELLES RUIZ. Op. Cit ., p. 104

decreciente que González & Rodríguez<sup>20</sup> lo define como aquel donde el valor interpretativo óptimo tiende a disminuirse, expresión presentada en la Ecuación 7.

$$\text{Improductividad del equipo (barriles)} = \text{Barriles no producidos}$$

$$\text{Horas Improductivas Equipo} = \text{Horas mantenimiento} + \text{Horas Hombre Improductivas mantenimiento}$$

Ecuación 6

$$\text{Barriles no producidos} = \text{Tiempo de ciclo} \times \text{Horas Improductivas del Equipo}$$

Ecuación 7

Este indicador hace parte del análisis económico del factor de productividad de las horas-hombre para las actividades de mantenimiento preventivo a las unidades de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas. Con el valor obtenido, se calcularon los índices presentados en las Ecuaciones 8, 9 y 10 que permiten monitorear el impacto económico que le representa a los pozos del Campo Casabe, cuando el equipo sale de línea para mantenimiento preventivo, dependiendo su retorno de la productividad de los trabajadores, como se presentó en la Ecuación 6.

$$\begin{aligned} &\text{Ingresos operacionales no percibidos} \\ &= \text{Barriles no producidos} \times \text{Precio del barril (USD)} \times \text{Valor Dólar (COP)} \end{aligned}$$

Ecuación 8

$$\text{Barriles no producidos por trabajador} = \frac{\text{Barriles no producidos}}{\text{N}^\circ \text{ Trabajadores en Mto}}$$

Ecuación 9

$$\text{Barriles no producidos por HH Mto} = \frac{\text{Barriles no producidos}}{\text{N}^\circ \text{ Horas hombre en Mto}}$$

Ecuación 10

---

<sup>20</sup> GONZÁLEZ, José y RODRÍGUEZ, Myriam. Gestión del conocimiento, capital intelectual e indicadores aplicados. 1 ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2017. 92p. ISBN: 978-84-9969-612-6

Los índices presentados en las Ecuaciones 8, 9 y 10 son de carácter decreciente, comparándose entre periodos para validar la productividad de las Horas-Hombre. Complementando y alineando con la definición de la gestión de productividad realizada por Yilma, Kitaw y Matebu<sup>21</sup> como la relación entre la cantidad de salida (es decir los productos, servicios o procesos llevados a cabo correctamente según las especificaciones requeridas) y las entradas (es decir, todo tipo de los recursos que se consumen en la transformación del proceso), se consideraron indicadores de productividad, para este caso Productividad Parcial que los describe Paz y González<sup>22</sup>, como todo lo producido por un sistema (salida) con uno de los recursos utilizados (insumo o entrada) que para este caso es la mano de obra involucrada en las actividades de mantenimiento.

Por medio de las ecuaciones 11, 12, 13 y 14 se mide la Productividad Parcial de las horas-hombre en el mantenimiento preventivo de las bombas mecánicas, PCP y las facilidades eléctricas relacionando los ingresos operacionales generados frente al consumo de Horas-Hombre.

$$\begin{aligned} & \text{Ingresos operacionales (Mensual)} \\ & = \text{Barriles producidos} \times \text{Precio del barril (USD)} \times \text{Valor Dólar COP} \quad \text{Ecuación 11} \end{aligned}$$

$$\text{Productividad Parcial 1 (Mensual)} = \frac{\text{Ingresos operacionales COP}}{\text{N}^\circ \text{ Trabajadores Mantenimiento}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\text{Productividad Parcial 2 (Mensual)} = \frac{\text{Ingresos operacionales COP}}{\text{HH Mantenimiento}} \quad \text{Ecuación 13}$$

---

<sup>21</sup> YILMA, Y. KITAW.D. MATEBU. A. Development of Productivity Measurement and Analysis Framework for Manufacturing Companies. Journal of Optimization in Industrial Engineering. Número 22. 2017. p.p 1-13. [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: [http://www.qjie.ir/article\\_274\\_14013af42811e68ef3b6c94bb3cee223.pdf](http://www.qjie.ir/article_274_14013af42811e68ef3b6c94bb3cee223.pdf)

<sup>22</sup> CARRO PAZ, Roberto y GONZÁLEZ, Daniel. Productividad y Competitividad. Buenos Aires: Alfa & Omega, 2013. vol. 1 [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: [https://www.academia.edu/download/55993832/02\\_productividad\\_competitividad.pdf](https://www.academia.edu/download/55993832/02_productividad_competitividad.pdf)

$$Productividad\ Parcial\ 3\ (Mensual) = \frac{Ingresos\ operacionales\ COP}{Costo\ HH\ Mantenimiento} \quad Ecuación\ 14$$

La variación de la productividad es el último indicador que hace parte del análisis económico, siendo el indicador que permite evaluar la tendencia de aumento o disminución de producción de barriles según el tiempo que se consuman realizando los mantenimientos preventivos, teniendo un valor porcentual claro que se describe en la Ecuación 15. Si el valor es positivo, significa que aumentó la producción de barriles entre el periodo anterior y el actual, reflejando mayor productividad de las horas-hombre en los mantenimientos preventivos, caso contrario si el indicador es negativo muestra que se tuvieron que consumir mayores Horas-Hombre.

$$\Delta Productividad = \frac{Barriles\ no\ producidos\ Periodo\ Anterior - Barriles\ no\ producidos\ Periodo\ Actual}{Barriles\ No\ Producidos\ Periodo\ Anterior} \times 100 \quad Ecuación\ 15$$

## **4 HISTÓRICO DE ATENCIONES REALIZADAS POR MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS DE LOS POZOS PRODUCTORES EN EL CAMPO CASABE CON EL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE**

### **4.1 INFORMACIÓN INICIAL**

Schirald<sup>23</sup> describe que la fortaleza del indicador de Efectividad Global de Equipos (OEE) radica en hacer que las pérdidas sean más transparentes y en resaltar áreas de mejora. La OEE a menudo se ve como un catalizador para el cambio y es fácil de entender por su característica de estar compuesto por tres razones en donde en cada una se pueden encontrar fallas en los factores productivos.

El resumen del modelo para el Análisis Económico del Factor de Productividad se presenta en el Anexo 1, el cual es descrito en paralelo por años en los capítulos 4.2 y 4.3. La información inicial para el modelo de análisis económico, presentada en la Tabla 2 fue tomada de la base de datos reportada por Ecopetrol S.A, de los pozos productivos e intervenidos en diciembre del 2019, relacionando:

- Cantidad de pozos productivos por equipo para mantenimiento (PCP, Bombeo Mecánico, Facilidades Eléctricas)
- Producción neta de barriles (Bopd) según el equipo para mantenimiento
- Producción neta promedio en barriles (Bodp) por pozo productivo
- Cantidad de mantenimiento preventivos mensuales programados por cada equipo para mantenimiento
- Producción neta promedio de los pozos con programación de mantenimiento preventivo en barriles (Bopd)

---

<sup>23</sup> SCHIRALD. Op. Cit., p. 31.

- Producción neta mensual de los pozos con programación de mantenimiento preventivo en barriles (Bbl), siendo esta la producción cuando no existe paradas o tiempos muertos en el equipo (la información de cantidad de pozos (1), producción neta (2) y pozos intervenidos (3), son registros de la empresa).

**Tabla 2. Información Inicial Modelo OEE**

Equipo Mantenimiento	Cantidad Pozos en campo(1)	Producción Neta en campo (Bopd) (2)	Producción Neta (Bopd) Promedio por pozo (2/1)	Pozos intervenidos mantenimiento preventivo mensual (3)	Producción Neta Promedio (Bopd) pozos intervenidos mantenimiento preventivo (4)	Producción Neta Promedio Mensual pozos intervenidos mantenimiento preventivo
<b>PCP</b>	179	10342	$(10342/179)= 57,8$	24	$(57,8*24)=1386,7$	$(1386,7*30)=41601$
<b>BM</b>	70	3734	$(3734/70)=53,3$	20	$(53,3*20)=1066,8$	$(1066,8*30)=32004$
<b>FE</b>	249	14076	$(14076/249)=111,1$	44	$(111,1*44)=2453,5$	$(2453,5*30)=73604$

Fuente: Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

## 4.2 HISTÓRICO EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS

### 1. *Primer Paso: Disponibilidad*

- Como punto de partida, se determinó el tiempo de disponibilidad de los equipos de facilidades de superficie instalados en los pozos productores (unidades de bombeo, variadores, motores, acometidas eléctricas), siendo el tiempo en que se encuentran operando sin interrupciones, los mostrados en la Tabla 3.
- Siguiendo con la fórmula para obtener la disponibilidad, se procede a calcular el tiempo operativo que resulta de restar del tiempo disponible de los equipos, el tiempo que estos se encuentran inactivos por el mantenimiento preventivo, presentando los valores en la Tabla 4.

- Finalmente, el cálculo del índice de disponibilidad del equipo se obtiene al relacionar el tiempo operativo contra el tiempo disponible de los equipos. Esta información se presenta en la Tabla 5.
- La información presentada en las Tablas 4 del tiempo operativo corresponde a la reportada para los años 2017 y 2018, en donde para los dos años, se reportaron las mismas Horas de Inactividad de los pozos por mantenimiento preventivo. En las Tablas 6 y 7, se muestra los resultados para el año 2019 cuyo tiempo de inactividad de los pozos por mantenimiento preventivo, fueron diferentes.

**Tabla 3. Cálculo de Tiempo Disponible de Equipo**

Equipo Mantenimiento	Horas Diarias de Trabajo	Cantidad Pozos intervenidos mantenimiento preventivo mensual	Días de Trabajo mensual	Tiempo Disponible Mensual Resultado (Horas)
PCP	8	24	30	5760
BM	8	20	30	4800
FE	8	44	30	10560

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 4. Cálculo de Tiempo Operativo de Equipo (2017-2018)**

Equipo Mantenimiento	Tiempo Disponible Mensual Resultado (Horas)	Horas Inactividad mensual pozos por mantenimiento preventivo	Tiempo operativo Resultado (Horas)
PCP	5760	250	5510
BM	4800	230	4570
FE	10560	480	10080

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 5. Cálculo Razón Disponibilidad Equipo (2017-2018)**

Equipo Mantenimiento	Tiempo Disponible (Horas)	Tiempo Operativo (Horas)	Disponibilidad Resultado
PCP	5760	5510	0,95660=95,66%

<b>BM</b>	4800	4570	0,95208=95,28%
<b>FE</b>	10560	10080	0,95455=95,45%

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 6.** Cálculo de Tiempo Operativo de Equipo (2019)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo Disponible Mensual Resultado (Horas)</b>	<b>Horas Inactividad mensual pozos por mantenimiento preventivo</b>	<b>Tiempo operativo Resultado (Horas)</b>
<b>PCP</b>	5760	144	5616
<b>BM</b>	4800	120	4680
<b>FE</b>	10560	264	10296

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 7.** Cálculo Razón Disponibilidad Equipo (2019)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo Disponible (Horas)</b>	<b>Tiempo Operativo (Horas)</b>	<b>Disponibilidad Resultado</b>
<b>PCP</b>	5760	5616	0,975=97,5%
<b>BM</b>	4800	4680	0,975=97,5%
<b>FE</b>	10560	10296	0,975=97,5%

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

## **2. Segundo Paso: Rendimiento**

- Inicialmente se realizó el cálculo del tiempo de ciclo relacionando el tiempo de disponibilidad de los equipos para producir frente a la producción esperada o teórica, tomando los valores reportados para diciembre del 2019. Los resultados para el año 2017 y 2018 se presentan en la Tabla 8.
- Continuando con la fórmula, se calculó el tiempo de producción real que se obtuvo descontando al tiempo operativo, las horas improductivas del equipo que se dan por las actividades improductivas de los trabajadores (como

estas horas son grupales, se dividieron en doce que son las personas que conforman la cuadrilla), que fueron presentadas en la Tabla 1. Esta información es reportada por los estudios de métodos y tiempos que realizaron en el campo Casabe para las actividades de mantenimiento preventivo. El valor obtenido se multiplicó con el tiempo de ciclo para obtener la cantidad de barriles producidos en el tiempo productivo del equipo.

- Finalmente, el índice de rendimiento del equipo resulta de la relación entre el tiempo de producción real presentado en la Tabla 9 (barriles producidos X tiempo de ciclo) y el tiempo operativo, teniendo los resultados en la Tabla 10.
- Los resultados para el año 2019, se presentan en las Tablas 11 y 12.

**Tabla 8.** Cálculo Tiempo de Ciclo

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Producción Neta Promedio Mensual pozos</b>	<b>Tiempo Disponible Mensual (Horas)</b>	<b>Tiempo de ciclo resultado (Horas/Bbl)</b>
<b>PCP</b>	41601	5760	0,13846
<b>BM</b>	32004	4800	0,14998
<b>FE</b>	73604	10560	0,14347

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 9.** Cálculo Producción Real (Barriles) 2017-2018

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo de ciclo resultado (Horas/Bbl)</b>	<b>Tiempo Operativo (Horas)</b>	<b>Horas Inactivos en actividades improductivas Mantenimiento preventivo</b>	<b>Tiempo Producción Real (Horas)</b>	<b>Barriles Producidos (Bbl) mensual</b>
<b>PCP</b>	0,13846	5510	59	5450	39365
<b>BM</b>	0,14998	4570	59	4510	30073

<b>FE</b>	0,14347	10080	59	10020	69844
-----------	---------	-------	----	-------	-------

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 10.** Cálculo Índice de Rendimiento 2017-2018

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo de ciclo resultado (Horas/Bbl)</b>	<b>Barriles Producidos (Bbl)</b>	<b>Tiempo Producción Real (Horas)</b>	<b>Tiempo operativo (Horas)</b>	<b>Rendimiento Resultado</b>
<b>PCP</b>	0,13846	39365	5450	5510	0,98920
<b>BM</b>	0,14998	30073	4510	4570	0,98698
<b>FE</b>	0,14347	69844	10020	10080	0,99410

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 11.** Cálculo Producción Real (Barriles) 2019

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo de ciclo resultado (Horas/Bbl)</b>	<b>Tiempo Operativo (Horas)</b>	<b>Horas Inactivos en actividades improductivas Mantenimiento preventivo</b>	<b>Tiempo Producción Real (Horas)</b>	<b>Barriles Producidos (Bbl) al mes</b>
<b>PCP</b>	0,13846	5616	47	5569	40220
<b>BM</b>	0,14998	4680	47	4633	30889
<b>FE</b>	0,14347	10296	47	10249	71436

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 12.** Cálculo Índice de Rendimiento 2019

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo de ciclo resultado (Horas/Bbl)</b>	<b>Barriles Producidos mensual (Bbl)</b>	<b>Tiempo Producción Real (Horas)</b>	<b>Tiempo operativo (Horas)</b>	<b>Rendimiento Resultado</b>
<b>PCP</b>	0,13846	40220	5569	5510	0,9916
<b>BM</b>	0,14998	30889	4633	4570	0,9899
<b>FE</b>	0,14347	71436	10249	10080	0,9954

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

### 3. Tercer Paso: Calidad

- La calidad hace referencia a la producción de barriles de petróleo extraídos por facilidades de superficie instalados en los pozos productores (unidades de bombeo, variadores, motores, acometidas eléctricas) que fue aprovechada y que cumplió con las características, es decir, los barriles que fueron conformes para la producción de sus derivados del total de extraídos. Para efectos de este trabajo de grado, se consideró la conformidad del 100% teniendo en cuenta que este indicador no relaciona el factor de productividad de las Horas-Hombre en las actividades de mantenimiento preventivo. Los resultados de calidad para los años 2017 y 2018 se muestran en la Tabla 13 y el año 2019 en la Tabla 14.

**Tabla 13.** Cálculo Índice de Calidad 2017-2018

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles Producidos (Bbl) mensual</b>	<b>Barriles conformes (Bbl) mensual</b>	<b>Calidad Resultado</b>
<b>PCP</b>	39365	39365	1
<b>BM</b>	30073	30073	1
<b>FE</b>	69844	69844	1

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 14.** Cálculo Índice de Calidad 2019

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles Producidos (Bbl) mensual</b>	<b>Barriles conformes (Bbl) mensual</b>	<b>Calidad</b>
<b>PCP</b>	40220	40220	1
<b>BM</b>	30889	30889	1
<b>FE</b>	71436	71436	1

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

### 4. Cuarto Paso: Efectividad Global del Equipo OEE

- Obtenidos los valores de las razones o índices de disponibilidad, rendimiento y calidad, se calculó la Efectividad Global del Equipo que es el resultado de la multiplicación de estos tres índices, resultados que se presentan en la Tabla 15 para el año 2017 y 2018 y en la Tabla 16 para el año 2019.

**Tabla 15.** Cálculo Efectividad Global del Equipo OEE 2017-2018

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Calidad</b>	<b>OEE</b>
<b>PCP</b>	95,660	0,98920	1	94,62
<b>BM</b>	95,208	0,98698	1	93,96
<b>FE</b>	95,455	0,99410	1	94,89

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 16.** Cálculo Efectividad Global del Equipo OEE 2019

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Calidad</b>	<b>OEE</b>
<b>PCP</b>	97,5	0,99161	1	96,68
<b>BM</b>	97,5	0,98993	1	96,51
<b>FE</b>	97,5	0,99542	1	97,05

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

### **4.3 HISTÓRICO DEL ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCTIVIDAD DE HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

#### **1. Barriles no producidos**

El conocimiento de la improductividad de las horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo, se dio a través de los barriles que los equipos (Bombeo mecánico, PCP y Facilidades), dejaron de producir por estar fuera de línea. Para esto se empleó el tiempo de ciclo y el tiempo improductivo del equipo,

multiplicándolos para obtener los barriles presentados en la Tabla 17 para el año 2017 y 2018. Los resultados del año 2019, se registraron en la Tabla 19.

**Tabla 17.** Cálculo Barriles No Producidos (2017-2018)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo de ciclo (Horas/barril)</b>	<b>Horas Inactivos en actividades improductivas Mantenimiento preventivo</b>	<b>Horas inactivo pozos mensual mantenimiento preventivo</b>	<b>Barriles no producidos actividades improductivas Mantenimiento preventivo</b>	<b>Barriles no producidos por mantenimiento Preventivo</b>	<b>Barriles no producidos</b>
<b>PCP</b>	0,13846	59,52	250	430	1806	2235
<b>BM</b>	0,14998	59,52	230	397	1534	1930
<b>FE</b>	0,14347	59,52	480	415	3346	3761

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 18.** Cálculo Barriles No Producidos (2019)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Tiempo de ciclo (Horas/barril)</b>	<b>Horas Inactivos en actividades improductivas Mantenimiento preventivo</b>	<b>Horas inactivo pozos mensual mantenimiento preventivo</b>	<b>Barriles no producidos actividades improductivas Mantenimiento preventivo</b>	<b>Barriles no producidos mantenimiento Preventivo</b>	<b>Barriles no producidos</b>
<b>PCP</b>	0,13846	47,12	144	340	1040	1380
<b>BM</b>	0,14998	47,12	120	314	800	1114
<b>FE</b>	0,14347	47,12	264	328	1840	2169

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

## **2. Indicadores de productividad Horas-hombre Mantenimiento Preventivo**

Los controles en la ejecución de los mantenimientos preventivos, se realizan mientras se tenga una visión clara del impacto que genera la improductividad de los trabajadores. Es por esto que se definieron los indicadores como ingresos operacionales dejados de percibir, barriles no producidos por trabajador y barriles

no producidos por Hora- Hombre en mantenimiento, siendo indicadores que muestran la productividad sí su tendencia es decreciente.

- Para el caso del primer indicador sobre los ingresos operacionales dejados de percibir, se mide en términos de pesos colombianos (COP) para evaluar el impacto operacional en el Estado de Resultados de la compañía, teniendo para los periodos en estudio, los resultados de la Tabla 19 Y 20.

**Tabla 19.** Cálculo Ingresos Operacionales No Percibidos (2017-2018)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles no producidos 2017-2018</b>	<b>Precio Promedio Barril 2019<sup>24</sup></b>	<b>Precio Dólar 31 Diciembre 2019<sup>25</sup></b>	<b>Ingresos Operacional no percibidos 2017-2018</b>
<b>PCP</b>	2235	61,05	3.277	447.248.265
<b>BM</b>	1930	61,05	3.277	386.206.580
<b>FE</b>	3761	61,05	3.277	752.365.408

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 20.** Cálculo Ingresos Operacionales No Percibidos (2019)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles no producidos 2019</b>	<b>Precio Promedio Barril 31 Diciembre 2019</b>	<b>Precio Dólar 31 Diciembre 2019</b>	<b>Ingresos Operacional no percibidos 2019</b>
<b>PCP</b>	1380	61,05	3.277	276.159.823
<b>BM</b>	1114	61,05	3.277	222.927.283
<b>FE</b>	2169	61,05	3.277	433.856.208

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

<sup>24</sup> <https://lta.reuters.com/articulo/mercados-petroleo-sondeo-idLTAKCN1OU0J5>

<sup>25</sup> <https://actualicese.com/tasa-representativa-del-mercado-al-31-de-diciembre-de-2019-queda-en-3-27714/>

- La productividad de las horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo, se evidenciaron por medio de los barriles que cada trabajador dejó de producir. La información referente al año 2017 y 2018, se muestran en la Tabla 21 mientras que la Tabla 22 presenta el año 2019.

**Tabla 21.** Barriles No Producidos – Productividad Mano de obra (2017-2018)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles no producidos (A)</b>	<b>N° Trabajadores en Mantenimiento preventivo (B)</b>	<b>Total Horas-hombres al mes (C) (12x8x24)</b>	<b>N° barriles no producidos por trabajador de mantenimiento al mes (A/B)</b>	<b>N° barriles no producidos por Horas-hombre de mantenimiento al mes (A/C)</b>
<b>PCP</b>	2235	12	2304	186,29	0,97
<b>BM</b>	1930	12	2304	160,86	0,84
<b>FE</b>	3761	12	2304	313,38	1,63

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 22.** Barriles No Producidos - Productividad (2019)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles no producidos (A)</b>	<b>N° Trabajadores en Mantenimiento preventivo (B)</b>	<b>Total Horas-hombres al mes (C)</b>	<b>N° barriles no producidos por trabajador de mantenimiento al mes (A/B)</b>	<b>N° barriles no producidos por Horas-hombre de mantenimiento al mes (A/C)</b>
<b>PCP</b>	1380	12	2304	115,03	0,60
<b>BM</b>	1114	12	2304	92,85	0,48
<b>FE</b>	2169	12	2304	180,71	0,94

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

- La medición de la productividad también se dió por medio del indicador de la productividad parcial que describe las salidas obtenidas con determinados insumos consumidos. En este caso las salidas obtenidas se

dieron en términos de los ingresos operacionales o ventas como lo evalúa Morales y Masis <sup>26</sup> en el Modelo Económico Integral de productividad, empleando las Ecuaciones 11, 12, 13 y 14, teniendo los valores de la Ecuación 11 en la Tabla 23 para el año 2017- 2018 y la Tabla 24 para el 2019. La productividad parcial tomando como insumos las horas-hombre, se presentan en la Tabla 25, 26 y 27.

**Tabla 23.** Cálculo Ingresos Operacionales (2017-2018)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles producidos 2017-2018</b>	<b>Precio Promedio Barril 31 Diciembre 2019</b>	<b>Precio Dólar 31 Diciembre 2019</b>	<b>Ingresos Operacional 2017-2018</b>
<b>PCP</b>	39365	61,05	3.277	7.875.777.930
<b>BM</b>	30073	61,05	3.277	6.016.757.810
<b>FE</b>	69844	61,05	3.277	13.973.625.177

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 24.** Cálculo Ingresos Operacionales (2019)

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles producidos 2019</b>	<b>Precio Promedio Barril 2019</b>	<b>Precio Dólar 31 Diciembre 2019</b>	<b>Ingresos Operacional 2019</b>
<b>PCP</b>	40220	61,05	3.277	8.046.866.371
<b>BM</b>	30889	61,05	3.277	6.180.037.107
<b>FE</b>	71436	61,05	3.277	14.292.134.377

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 25.** Productividad Parcial 1 (Ingresos/Trabajador)

<b>Equipo</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Ingresos</b>	<b>N°</b>	<b>Productividad Parcial 1</b>
---------------	-----------------	-----------------	-----------	--------------------------------

<sup>26</sup> MORALES, Cristina. MASIS, Alejandro. La medición de la productividad del valor agregado: una aplicación empírica en una cooperativa agroalimentaria de Costa Rica. TEC empresarial. Volumen 8. Número 2. 2014. p.p 41-49 [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/te.v8i2.1988>

Mantenimiento	Operacional percibidos 2017-2018	Operacional percibidos 2019	Trabajadores	(Ingresos /Trabajador) COP	
				2017-2018	2019
<b>PCP</b>	7.875.777.930	8.046.866.371	12	656.314.828	670.572.198
<b>BM</b>	6.016.757.810	6.180.037.107	12	501.396.484	515.003.092
<b>FE</b>	13.973.625.177	14.292.134.377	12	1.164.468.765	1.191.011.198

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 26.** Productividad Parcial 2 (Ingresos/HH)

Equipo Mantenimiento	Ingresos Operacional percibidos 2017-2018	Ingresos Operacional percibidos 2019	HH (12x8x24)	Productividad Parcial 2 (Ingresos /HH) COP	
				2017-2018	2019
<b>PCP</b>	7.875.777.930	8.046.866.371	2304	3.418.306	3.492.564
<b>BM</b>	6.016.757.810	6.180.037.107	2304	2.611.440	2.682.308
<b>FE</b>	13.973.625.177	14.292.134.377	2304	6.064.941	6.203.183

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 27.** Productividad Parcial 2 (Ingresos/HH)

Equipo Mantenimiento	Ingresos Operacional percibidos 2017-2018	Ingresos Operacional percibidos 2019	Costo HH	Productividad Parcial 3 (Ingresos /Costo HH) COP	
				2017-2018	2019
<b>PCP</b>	7.875.777.930	8.046.866.371	145.152.000	54,26	55,44
<b>BM</b>	6.016.757.810	6.180.037.107	145.152.000	41,45	42,58
<b>FE</b>	13.973.625.177	14.292.134.377	145.152.000	96,27	98,46

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

### **3. Variación de la productividad Horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo**

La variación de la productividad es la que determina qué tan productiva fue la mano de obra en las intervenciones y gestión de los mantenimientos preventivos. Por facilidad de comprensión, se realizó en función de los barriles no producidos por los tiempos muertos que tuvieron los equipos de bombeo mecánico, PCP y facilidades eléctricas, arrojando los valores que se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Variación productividad Horas-hombres en Mantenimiento Preventivo

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles no producidos 2017-2018</b>	<b>Barriles no producidos 2019</b>	<b>Δ Productividad</b>	<b>Δ Productividad</b>	<b>% Variación Productividad</b>
<b>PCP</b>	2235	1380	(2235-1380)/1380	0,3825	38,25%
<b>BM</b>	1930	1114	(1930-1114)/1114	0,4228	42,28%
<b>FE</b>	3761	2169	(3761-2169)/2169	0,4233	42,23%

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

## **5 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL FACTOR DE PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A LAS UNIDADES DE BOMBEO MECÁNICO, PCP Y FACILIDADES ELÉCTRICAS DE LOS POZOS PRODUCTORES. ENFASIS EN GERENCIA Y ECONOMÍA DE HIDROCARBUROS.**

### **5.1 INFORMACIÓN INICIAL**

El análisis económico del factor de productividad de horas-hombre, se realizó por medio de los resultados de la Efectividad Global de los Equipos (OEE), los indicadores de productividad de la labor, barriles producidos y no producidos, obteniendo diferentes perspectivas del impacto económico que representa el mantenimiento preventivo de los sistemas de producción PCP, Bombeo Mecánico y Facilidades Eléctricas, para buscar estrategias que Lazim y Ramayah<sup>27</sup> refieren como evitar interrupciones debido a paros y fallas en la avería del equipo para así poder operar de manera eficiente y efectiva.

### **5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS**

El análisis económico de la efectividad global de los equipos tiene relación con la productividad de los trabajadores del área de mantenimiento porque ante un menor tiempo en estas actividades, mayor tiempo los equipos van a estar produciendo barriles de petróleo, esto cumpliendo estándares de calidad para que el mantenimiento sea eficaz y el equipo trabaje de forma continua siendo lo que se

---

<sup>27</sup> LAZIM, Halim y RAMAYAH, T. Maintenance strategy in Malaysian manufacturing companies: a total productive maintenance (TPM) approach. En: *Business Strategy Series*. 2010. p 2. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Halim\\_Lazim/publication/241675292\\_Maintenance\\_strategy\\_in\\_Malaysian\\_manufacturing\\_companies\\_A\\_total\\_productive\\_maintenance\\_TPM\\_approach/links/55fcc7c008ae07629e13e8ff/Maintenance-strategy-in-Malaysian-manufacturing-companies-A-total-productive-maintenance-TPM-approach.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Halim_Lazim/publication/241675292_Maintenance_strategy_in_Malaysian_manufacturing_companies_A_total_productive_maintenance_TPM_approach/links/55fcc7c008ae07629e13e8ff/Maintenance-strategy-in-Malaysian-manufacturing-companies-A-total-productive-maintenance-TPM-approach.pdf)

busca con los mantenimientos preventivos, evitando que estos entren en paradas prolongadas por mantenimientos correctivos o reemplazo total del equipo, buscando mayor rendimiento que se traduce en rentabilidad que como lo mencionó Hansson, et al, citado por Peimbert-García, Beruvides y García-Hernández, “la rentabilidad y la competitividad a largo plazo no se pueden lograr sin un rendimiento sostenido del equipo”<sup>28</sup>

Las razones Disponibilidad y Rendimiento del modelo de Efectividad Global de Equipos, no alcanzan el 100% dado que en estas actividades se requiere un excelente mantenimiento y dentro de las actividades no generadoras de valor se encuentran las relacionadas a la seguridad del equipo y las personas que intervendrán, sin embargo se buscó su optimización y mejoramiento de los tiempos que como lo mencionó Jilcha y Kitaw<sup>29</sup>, el lugar de trabajo seguro y el trabajo seguro son necesarios para reducir los incidentes y aumentar la productividad siendo aspectos complementarios del desarrollo industrial.

El impacto económico en los dos periodos evaluados se analizó inicialmente tomando como referencia el indicador OEE que se muestra en la Tabla 29 reflejando un aumento de 2% que tuvo un gran impacto económico debido a las siguientes novedades:

**Tabla 29.** Variación en la Efectividad Global de los Equipos

---

<sup>28</sup> PEIMBERT-GARCÍA, Rodrigo; BERUVIDES, Mario; GARCÍA-HERNÁNDEZ, Diana. An economic framework for total productive maintenance (TPM). En: *IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE)*. Mayo 2012. p 2. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/289050081\\_An\\_Economic\\_Framework\\_for\\_total\\_productive\\_maintenance\\_TPM](https://www.researchgate.net/publication/289050081_An_Economic_Framework_for_total_productive_maintenance_TPM)

<sup>29</sup> JILCHA, KASSU y KITAW, DANIEL. Lean influence on occupational safety and health in manufacturing industries. En: *Global Journal of Research In Engineering*. 2016. vol. 16. p 1-8. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1446/1377>

Equipo Mantenimiento	OEE	OEE	%Variación
	2017- 2018	2019	
<b>PCP</b>	94,62	96,68	2,18%
<b>BM</b>	93,96	96,51	2,71%
<b>FE</b>	94,89	97,05	2,28%

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

- En la Teoría del Capital Humano (Arrow, 1962), citada por Marchante y Ortega<sup>30</sup> describen que la educación, la experiencia y la formación en el puesto de trabajo permiten al individuo desarrollar sus habilidades y conocimientos haciéndole más productivo. Los trabajadores cuentan con mayor experiencia, ejecutando su labor en un menor tiempo, siendo más eficientes, logrando disminuir el tiempo de inactividad del equipo, como resultado un aumento en la disponibilidad que se muestra en la Tabla 30.

**Tabla 30.** Variación Disponibilidad Equipo

Equipo Mantenimiento	Horas inactivo pozos mensual mantenimiento preventivo		Variación	% Variación
	2017-2018	2019		
<b>PCP</b>	250	144	0,42	42,40
<b>BM</b>	230	120	0,48	47,83
<b>FE</b>	480	264	0,45	45,00

<sup>30</sup> MARCHANTE, Andres y ORTEGA, Bienvenido. Capital humano, desajuste educativo y productividad del trabajo: un estudio para la industria hotelera. En: Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa. 2010. vol. 13, no. 44, p. 79-100. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1138575810700207>

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

- Se organizaron las actividades descritas en la Tabla 1 de tal forma que se tuvieran los permisos y aprobaciones en menor tiempo. Cada persona dentro de la cuadrilla, apoyó o gestionó las actividades, aprovechando la mano de obra, obteniendo los tiempos registrados en la Tabla 31 que contribuyen a tener aumento en el rendimiento del equipo.

**Tabla 31.** Variación Rendimiento Equipo

Equipo Mantenimiento	Horas Inactivos en actividades improductivas Mantenimiento preventivo		Variación	% Variación
	2017-2018	2019		
<b>PCP</b>	59,52	47,12	0,21	20,84
<b>BM</b>	59,52	47,12	0,21	20,84
<b>FE</b>	59,52	47,12	0,21	20,84

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

- El aumento de la productividad se debe principalmente al mejoramiento en los tiempos de ejecución de los mantenimientos que se redujeron en un 40% que representan la razón de disponibilidad del equipo, mientras que las actividades de la Tabla 1, se redujeron en un 20% sus tiempos, siendo esta última la razón de rendimiento del equipo, todo esto confirmando lo descrito por Nakajima citado por Peimbert-García, Beruvides y García-Hernández, describiendo que “La productividad, el costo, el inventario, la seguridad y la salud, y la producción y la calidad de la producción dependen del equipo”<sup>31</sup>

<sup>31</sup> PEIMBERT-GARCÍA, Rodrigo; BERUVIDES, Mario; GARCÍA-HERNÁNDEZ, Diana. Op. Cit., p. 2.

- El impacto económico se refleja al consumir menores tiempos en las actividades de mantenimiento, reduciendo los costos de la operación como se presentan en la Tabla 32 y Tabla 33 que para el caso de las unidades de bombeo mecánico y PCP se tuvo un ahorro alrededor de \$90.000.000 COP y Facilidades Eléctricas \$170.000.000 COP, aumentando la Utilidad Operacional de los pozos que como dijo Taiichi Ohno citado por Peimbert-García, Beruvides y García – Hernández, el mejoramiento de la eficiencia solo tiene sentido cuando está vinculado a una reducción de costos.<sup>32</sup>

**Tabla 32.** Costo Horas-hombre en Mantenimiento Preventivo

Equipo Mantenimiento	No Trabajadores	Valor COP HH	Costo Horas-hombre en Mantenimiento		
			2017-2018	2019	Disminución
<b>PCP</b>	12	63.000	189.000.000	108.864.000	80.136.000
<b>BM</b>	12	63.000	173.880.000	90.720.000	83.160.000
<b>FE</b>	12	63.000	362.880.000	199.584.000	163.296.000

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 33.** Costo Horas-hombre en Actividades Improductivas Mantenimiento Preventivo

Equipo Mantenimiento	No Trabajadores	Valor COP HH	Costo Horas-hombre		
			2017-2018	2019	Disminución
<b>PCP</b>	12	63.000	44.997.750	35.621.250	9.376.500
<b>BM</b>	12	63.000	44.997.750	35.621.250	9.376.500
<b>FE</b>	12	63.000	44.997.750	35.621.250	9.376.500

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

<sup>32</sup> Ibíd. p. 3

### 5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCTIVIDAD DE HORAS-HOMBRE EN TÉRMINOS DE BARRILES DE CRUDO PRODUCIDOS Y NO PRODUCIDOS

La productividad de las horas-hombre en las actividades de mantenimiento, se evaluó en función de los ingresos operacionales que se generan tras la producción de mayor cantidad de barriles al estar el equipo mayor tiempo en funcionamiento. En el modelo económico se planteó la propuesta para conocer la cantidad de barriles que se dejan de producir por estar el equipo en actividades de mantenimiento y en este apartado se evaluó su impacto económico.

En los periodos de estudio, se presentaron las cantidades estimadas de barriles no producidos, teniendo una variación que refleja una disminución. Así se evidenció que el aumento en 2% de la Efectividad Global de los Equipos, no sólo representa disminución en costos, también mantiene al equipo mayor tiempo en operación producción barriles (Tabla 34), realizando actividades generadoras de valor que Koshela y Sharpe citado por Ismail y Yusof<sup>33</sup> las describe como aquellas que convierten materiales y/o información en el requerimiento del cliente, en este caso barriles de petróleo que se convierten en ingresos operacionales (Tabla 35).

**Tabla 34.** Variación en barriles producidos

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles no Producidos</b>		<b>Nuevos producidos</b>
	<b>2017-2018</b>	<b>2019</b>	
<b>PCP</b>	2235	1380	855
<b>BM</b>	1930	1114	816
<b>FE</b>	3761	2169	1592

<sup>33</sup> ISMAIL, Hayrati y YUSOF, Zakaria. Perceptions towards non-value adding activities during the construction process. En: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2016. vol. 66. p. 00015. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2016/29/matecconf\\_ibcc2016\\_00015/matecconf\\_ibcc2016\\_00015.html](https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2016/29/matecconf_ibcc2016_00015/matecconf_ibcc2016_00015.html)

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 35.** Nuevos Ingresos Operacionales COP por Mejoramiento Mantenimiento Preventivo

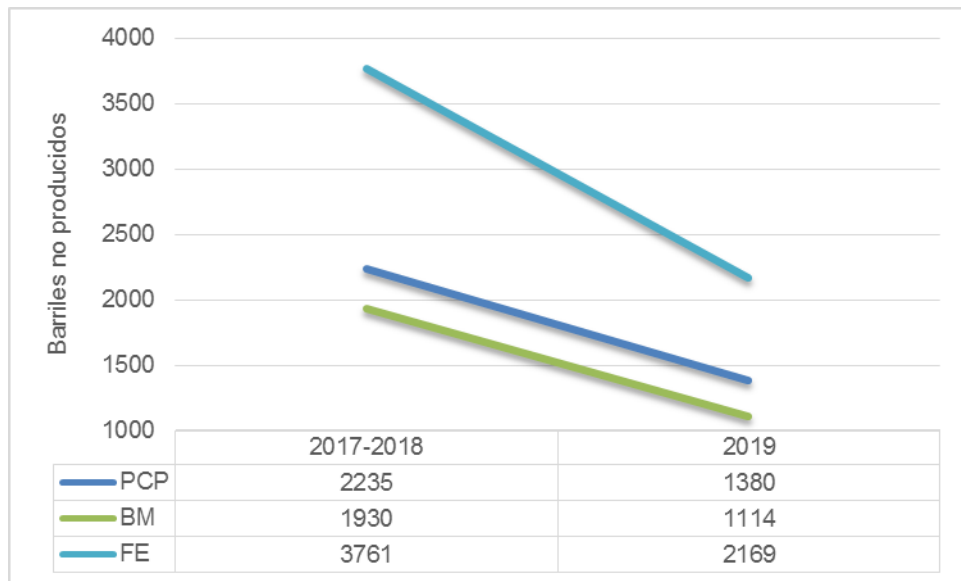
<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Nuevos producidos</b>	<b>Precio Promedio Barril 2019</b>	<b>Precio Dólar 31 Diciembre 2019</b>	<b>Nuevos ingresos operacionales COP</b>
<b>PCP</b>	855	61,05	3.277	171.052.026
<b>BM</b>	816	61,05	3.277	163.249.653
<b>FE</b>	1592	61,05	3.277	318.496.873

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

El aumento de la producción fue evidente ante el mejoramiento en los tiempos en las actividades de mantenimiento que para el caso del equipo PCP logró extraer 855 barriles adicionales, Bombeo mecánico 816 barriles y Facilidades Eléctricas 1.592 barriles. El aumento en los ingresos operacionales representa aumento en la Utilidad Bruta y Utilidad Neta del Estado de Resultados.

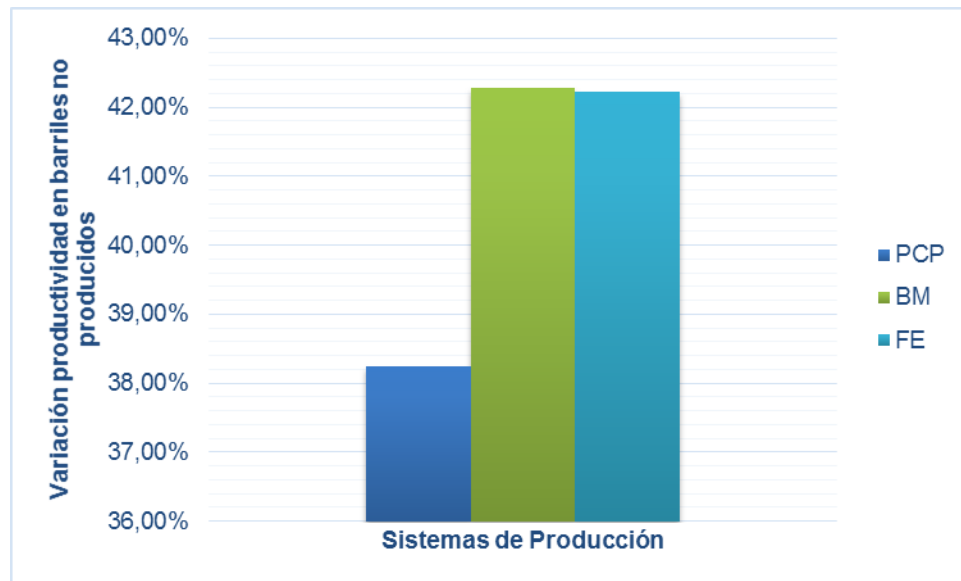
Igualmente, al tener un menor valor en los barriles no producidos se reflejan los mejoramientos en los mantenimientos preventivos de los sistemas de producción como se presentó en la Tabla 28 y en la Figura 3 en el que se evidencia el decrecimiento en barriles no producidos, teniendo la variación porcentual en la productividad en la Figura 4, teniendo el Bombeo Mecánico y Facilidades eléctricas los de más variación con porcentaje superior al 40%.

**Figura 3.** Variación en Barriles No producidos



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 4.** Variación Porcentual en Barriles No Producidos



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

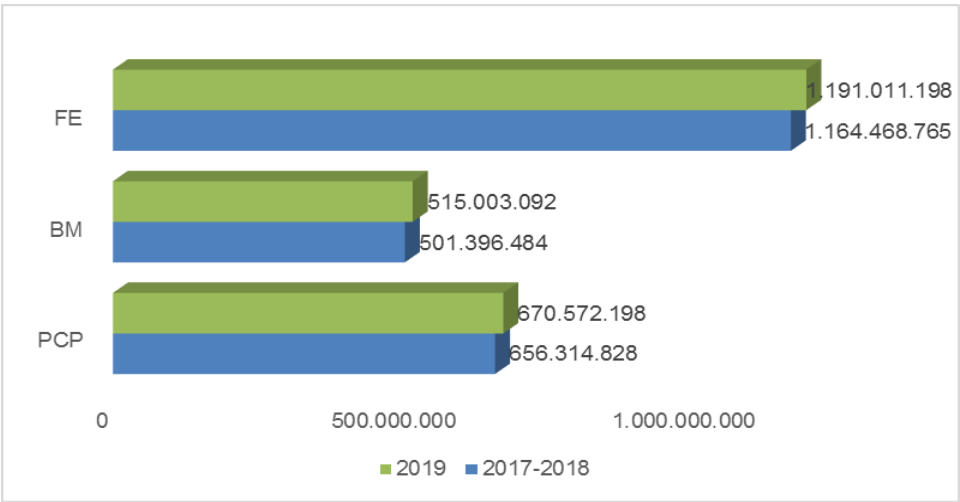
#### 5.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PRODUCTIVIDAD DE HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN FUNCIÓN DE PRODUCTIVIDAD PARCIAL

- **Productividad Parcial 1 (Ingresos Operacionales por Trabajador):** La tendencia de la Productividad Parcial 1 que relaciona los ingresos operacionales con la cantidad de trabajadores presentes en las actividades de mantenimiento preventivo para los tres sistemas de producción presentó alza en los periodos en estudio mostrado en la Figura 5. Este aumento representa que por cada trabajador involucrado en el área de mantenimiento se optimizó el tiempo de los mantenimientos preventivos en cada una de las unidades de producción.

Sin embargo, en la Figura 5 no se logra identificar cuál de los tres sistemas de producción tuvo mayor incremento, teniendo para esto la Figura 6 que ilustra que el Bombeo Mecánico, tuvo una leve mejora en comparación con

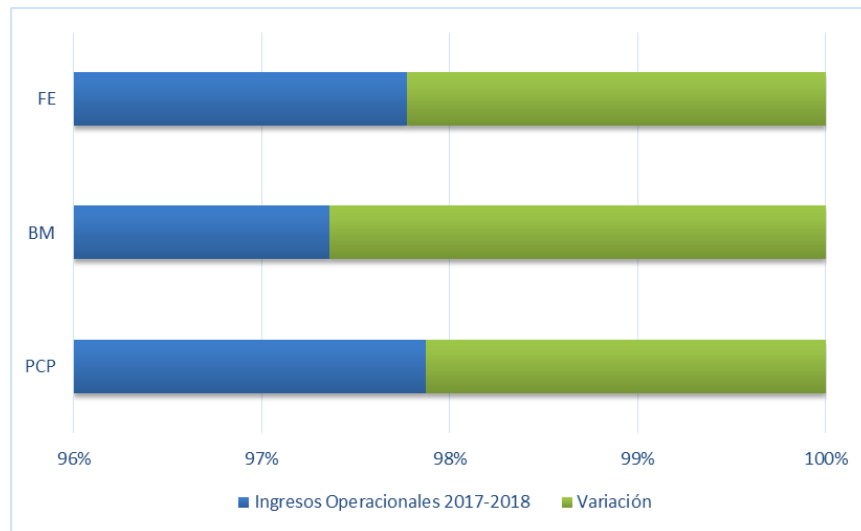
PCP y FE. Las variaciones en los ingresos operacionales afectan directamente los Estados Financieros de Resultados y de Flujo de Efectivo que en el caso de estudio, el impacto es positivo. En la Figura 7, se presentan los aportes en ingresos operacionales que generaron cada equipo.

**Figura 5.** Variación Productividad en Función de la Cantidad de Trabajadores



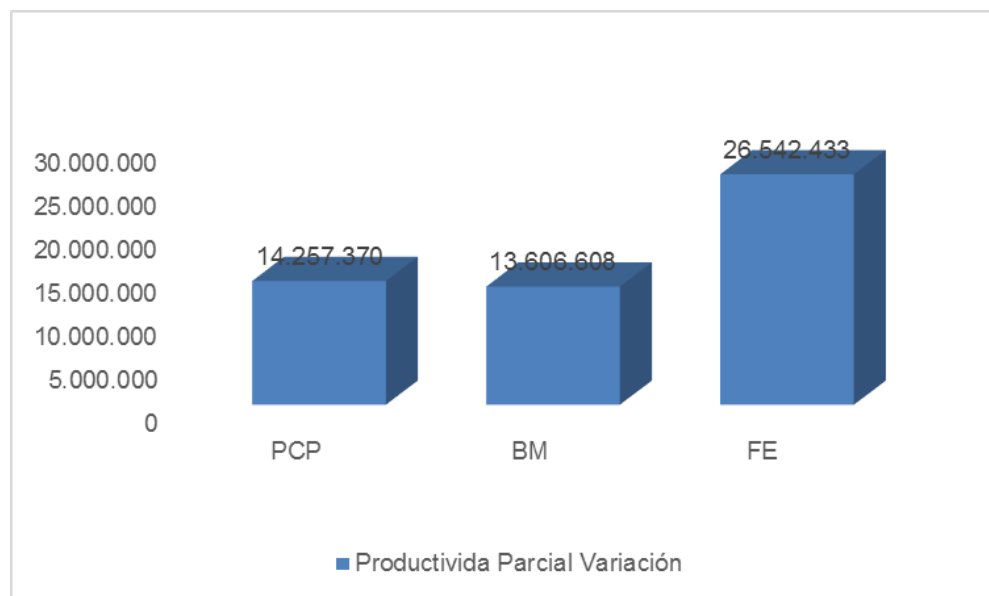
Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 6.** Variación Porcentual Productividad en Función de la Cantidad de Trabajadores



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 7. Aportes en Ingresos Operacionales por Equipo para mantenimiento**



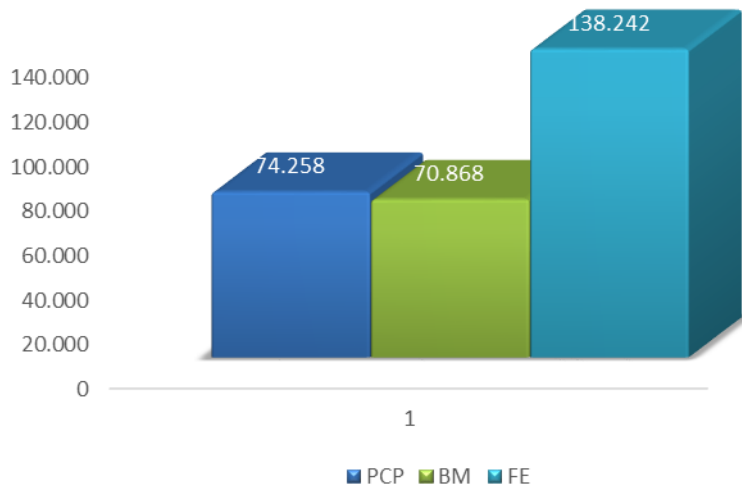
Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

- **Productividad Parcial 2 (Ingresos Operacionales por Horas-hombre):**

Las horas-hombre consumidas en los mantenimientos preventivos de los sistemas de producción del campo Casabe, tuvieron desempeños diferentes en los periodos

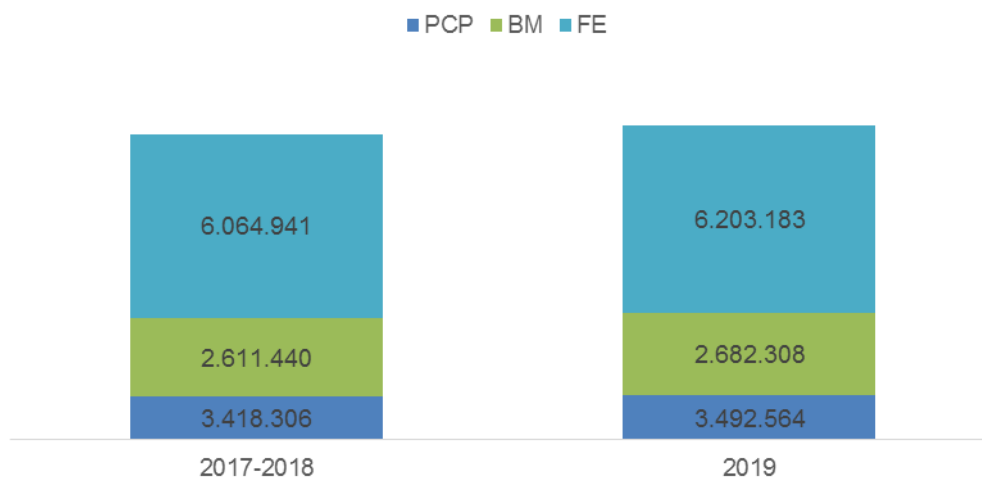
de estudio, teniendo para el caso de las facilidades eléctricas el mejor desempeño alcanzando con \$138.242 COP por hora hombre invertida, seguido por PCP con \$74.258 COP y de último bombeo mecánico con \$70.868, todo ilustrado en la Figura 8. La contribución en ingresos por hora hombre en los sistemas de producción, se mantiene entre periodos como se evidencia en la Figura 9, reflejando que se realizaron esfuerzos similares, desempeños proporcionales por parte de los trabajadores.

**Figura 8.** Variación Económica Productividad por Horas-hombre



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 9.** Comparativo Productividad en Horas-hombre por Equipo para mantenimiento



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

- **Productividad Parcial 3 (Ingresos Operacionales por Costos Horas-hombre):**

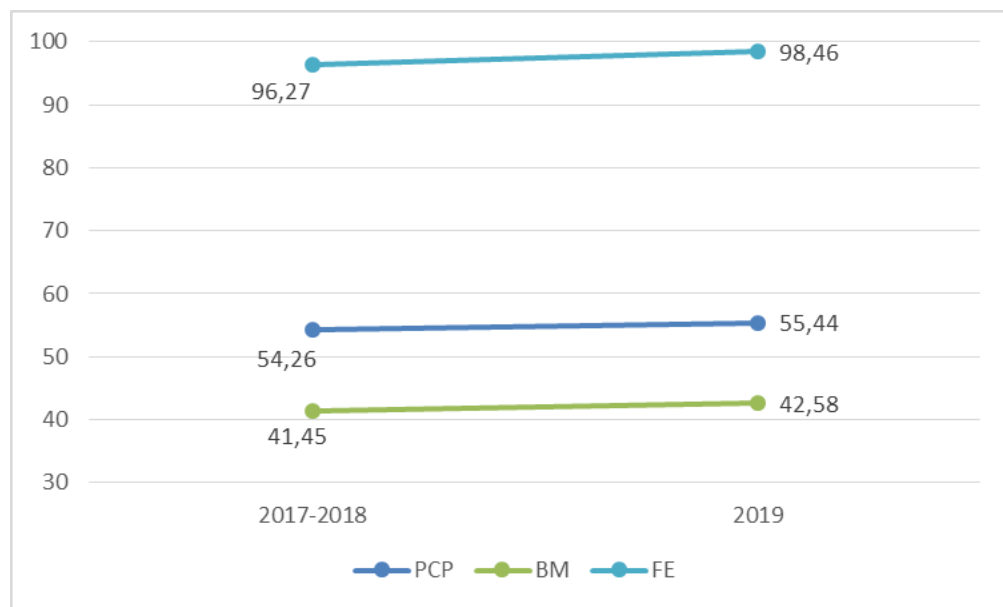
El conocimiento de la eficiencia económica de los recursos invertidos en las actividades de una compañía, se conoce por medio de los ingresos generados frente a la inversión asumida para llegar a dicho monto, siendo esta la razón por la que se calculó la Productividad Parcial relacionando Ingresos Operacionales contra Costos Horas-hombre cuya tendencia entre periodos fue creciente como se muestra en la Figura 10, sin embargo por la inclinación de las líneas, no se logra detectar el equipo que tuvo mayor rendimiento.

En términos porcentuales de eficiencia de los costos de horas-hombre invertidos, se tiene que el Bombeo Mecánico tuvo mejor rendimiento como se presenta en la Figura 11 con 2,65%, es decir que por cada peso invertido en horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo, se produjeron barriles de petróleo que generaron de 2,65 COP ingresos operacionales. Con ingresos por 2,22 COP por cada peso invertido en hora hombre de mantenimiento preventivo se tienen las

Facilidades Eléctricas (Figura 12) y con una diferencia mínima se separa del equipo PCP que logra 2,13 COP por cada peso invertido en dichas actividades (Figura 13).

Como lo expusieron Ramreddy y Choudhary<sup>34</sup>, para lograr una reducción efectiva en el tiempo de inactividad y aumentar la rentabilidad de la empresa, el valor de la eficacia general del equipo debe regularse.

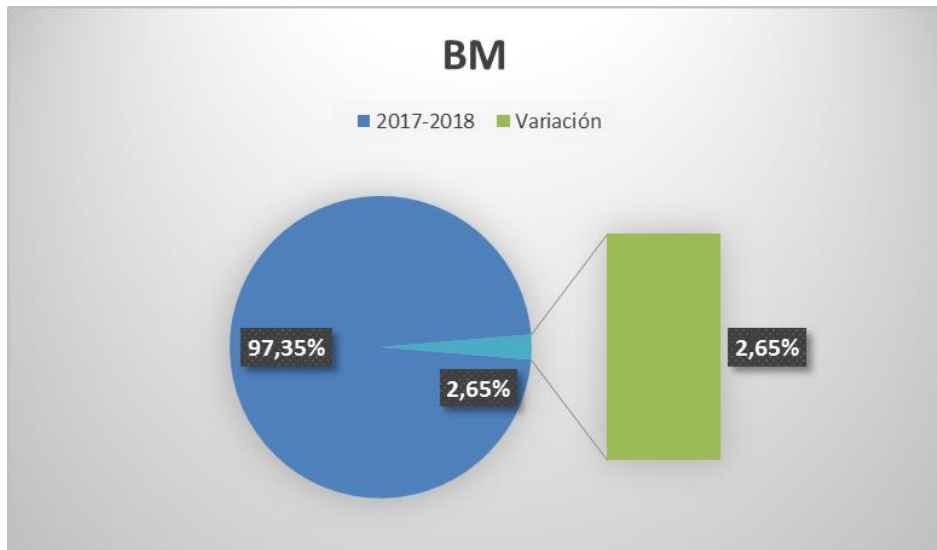
**Figura 10.** Tendencia Productividad en Función de Costo de Horas-hombre



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

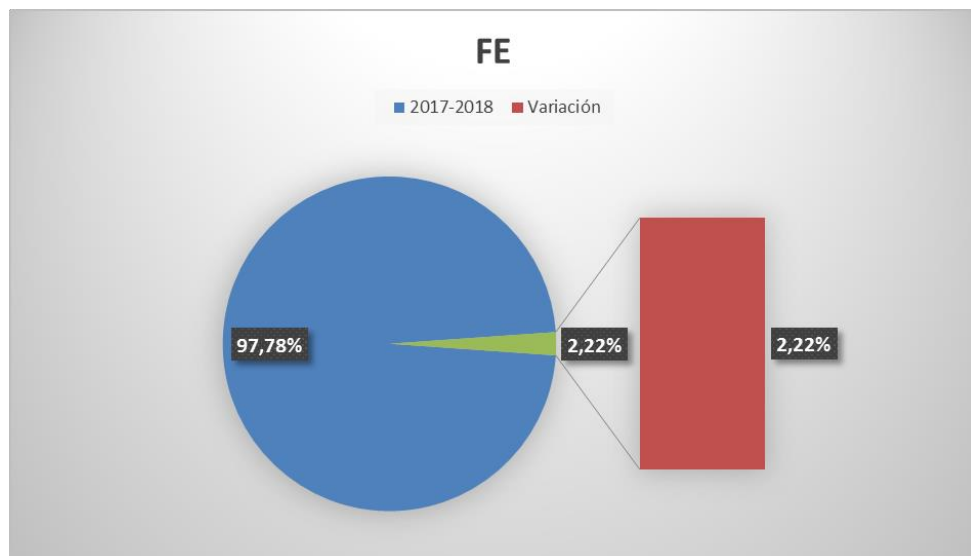
**Figura 11.** Rendimiento por Costo de Hora Hombre en BM

<sup>34</sup> RAMREDDY, B y CHOUDHARY, D. Enhancement of The Performance of an Industry By The Application of TQM Concepts. En: International Journal of Research in Engineering and Technology. Octubre 2013. vol. 02, no. 10, p. 410-420. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.684.3229&rep=rep1&type=pdf>



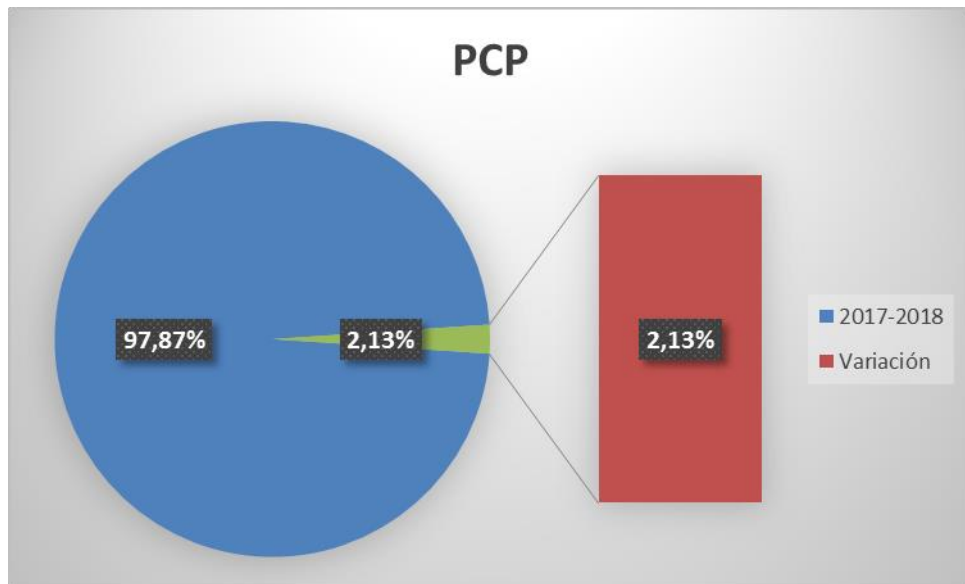
Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 12.** Rendimiento por Costo de Hora Hombre en FE



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 13.** Rendimiento por Costo de Hora Hombre en PCP



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

## **6 PROPUESTA PARA INCREMENTO PRODUCTIVIDAD HORAS-HOMBRE EN LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LOS EQUIPOS DE PCP, BOMBEO MECÁNICO Y FACILIDADES ELÉCTRICAS**

La propuesta para el incremento de la productividad de las horas-hombre en las actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de PCP, Bombeo mecánico y facilidades eléctricas es integral, con el fin de eliminar y reducir diferentes actividades que no generan valor en el proceso productivo y su finalidad. Se aplicó parcialmente el modelo de Mantenimiento Productivo Total, empleando el pilar que más contribuye en el mejoramiento de dicha condición.

Para lograr la propuesta, se inició con un análisis Pareto de las actividades previas que intervienen en el mantenimiento preventivo, detectando las no generadoras de valor que tienen mayor impacto y seguido se analizó el pilar de Mantenimiento Productivo Total que más se adapta y contribuye a la mejora.

### **6.1 ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES PARETO EN LOS MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS**

Las mediciones de tiempos en el campo Casabe para los mantenimientos preventivos, tienen un consolidado anual de los tiempos empleados en las actividades registradas en la Tabla 1, actividades que son iguales para los tres sistemas de producción porque por las características de las zonas, por directrices de Ecopetrol S.A se deben de seguir dichos protocolos para asegurar la actividad. En la Tabla 36 se muestra el resumen de las horas-hombre trabajadas en donde de las 27.684 horas que trabajan los doce trabajadores de la cuadrilla anualmente, se tiene un 25% de tiempo en actividades que no generaron valor, que si lo llevamos de forma proporcional a 8 horas de trabajo diaria por trabajador representa dos horas de trabajo y por la cuadrilla, 24 horas perdidas diarias.

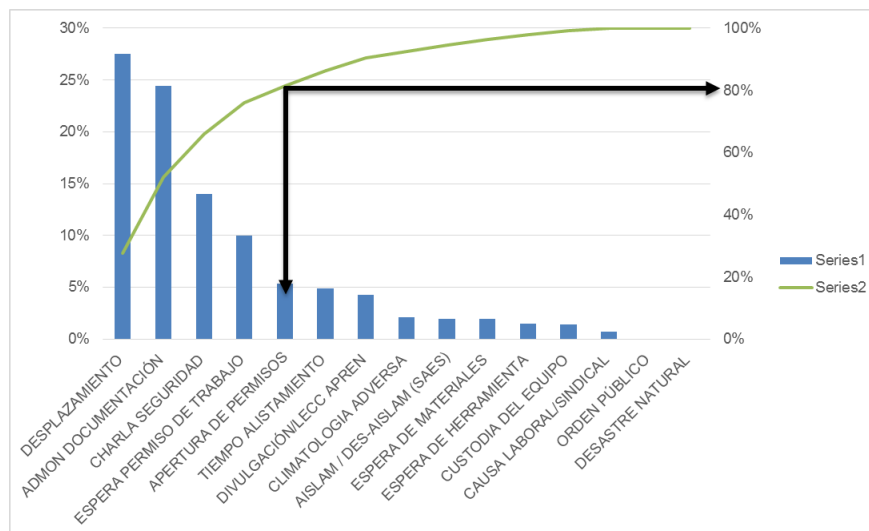
**Tabla 36.** Distribución de Horas-hombre Trabajadas Año 2019

<b>Horas de Hombre de Trabajo Anuales</b>	<b>%Distribución Horas-hombre</b>	<b>Distribución Horas-hombre</b>
<b>Horas-hombre Disponibles</b>	100%	27.648
<b>Horas-hombre Improductivas</b>	25%	6787
<b>Horas-hombre Productivas</b>	75%	20861

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

Estas pérdidas representan dos escenarios económicos primero un nivel de eficiencia por debajo del óptimo ya que diariamente se tienen 24 horas tiempo perdido representando pagos de salarios, prestaciones y demás requerimientos que implica tener trabajadores y segundo los barriles de petróleo que no se producen porque este tiempo puede ser invertido en las actividades propias de mantenimiento para liberar el equipo para su producción. Para lograr identificar las actividades que hacen que diariamente se pierdan aproximadamente 24 horas entre los doce trabajadores, se realizó el Diagrama de Pareto de la Figura 14 que muestra que existen cinco (5) actividades consumen el 81% de este tiempo, es decir 1,62 horas por trabajador que se traducen en 19 horas por cuadrilla al día, teniendo este registro en la Tabla 37 que corresponde al año 2019.

**Figura 14.** Diagrama Pareto de las Actividades no Generadoras de Valor



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 37.** Actividades Pareto No Generadoras de Valor al Día

ACTIVIDAD	%Tiempo consumido	Horas	Minutos
Desplazamiento	28%	0,54	32,41
Administración de la documentación	24%	0,48	28,75
Charla seguridad	14%	0,27	16,49
Espera permiso de trabajo	10%	0,20	11,77
Apertura de permisos	5%	0,11	6,31

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

## 6.2 PROPUESTA DE PILAR DE MANTENIMIENTO PRODUCTIVO Y TOTAL EN ACTIVIDADES PARETO

El pilar de Mantenimiento Productivo Total que se ajustó a las actividades Pareto es el de actividades de departamentos administrativos y de apoyo buscando

reducir los retrasos que como lo describió Lleras y Redondo<sup>35</sup> la mejora de las tareas administrativas se orienta a su eficiencia, velocidad y a reducir el número de personas necesarias, lográndose por medio de la automatización de las tareas de oficina e incrementando la eficiencia en el apoyo a las decisiones.

### 1. *Primer Paso: Desplazamiento*

Inicialmente se detectó que el “Desplazamiento”, fue el que tuvo mayor desaceleración durante el transcurso de los tres años de estudio, presentando la pendiente más negativa, proyectando para el cuarto año el 2020 un valor de 542 horas-hombre (Tabla 38), valor que se obtiene mediante la ecuación que representa la tendencia, presentada en la Figura 15.

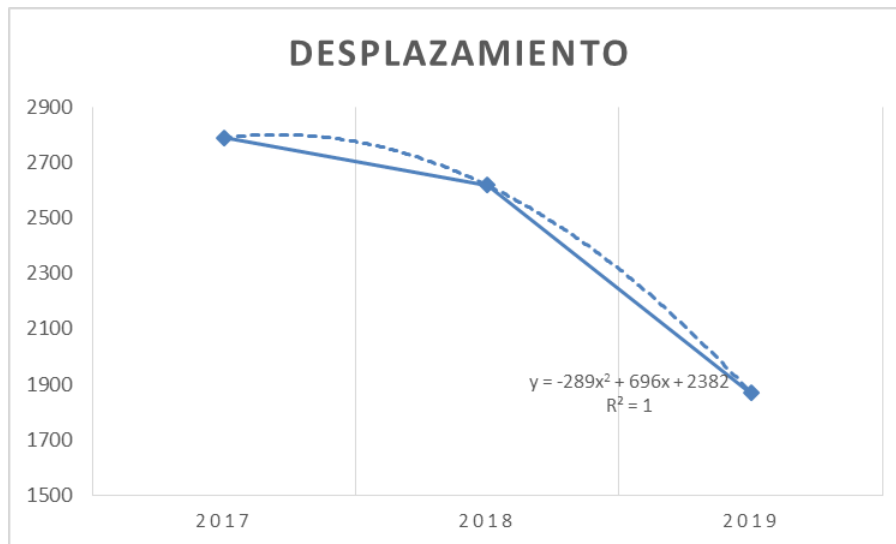
**Tabla 38.** Proyección de tiempo de desplazamientos

Ecuación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4 (Proyectado)
$y = -289x^2 + 696x + 2382$	2789	2618	1869	542

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 15.** Tendencia de Tiempos de Desplazamiento

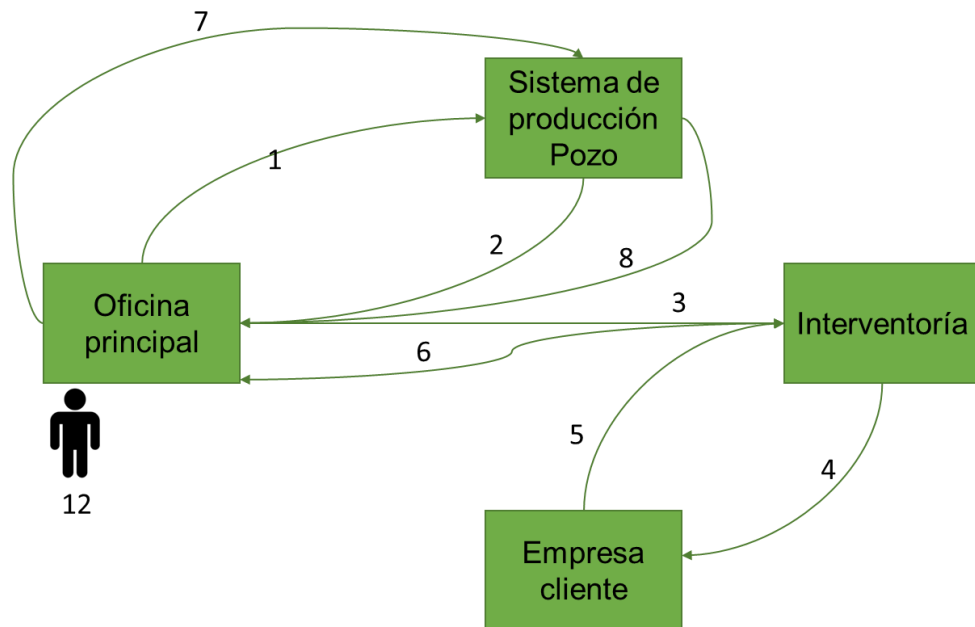
<sup>35</sup> LLERAS, Jose y REDONDO, Jesus. Diseño de un sistema de gestión basado en la metodología de mantenimiento productivo total (TPM) para una empresa de alquiler. Trabajo de grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2019. 43p



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

Los tiempos de desplazamientos entre la sede u oficina principal y el área de trabajo, depende de la distancia hacia el pozo pero la optimización de las horas-hombre en los demás es posible por medio de su organización. En la Figura 16, se muestran los movimientos mínimos que realizan los trabajadores en las actividades de mantenimiento preventivo de los sistemas de producción, invirtiéndose en los trámites para los permisos de trabajo que son los que permiten que se inician las labores propias del mantenimiento preventivo.

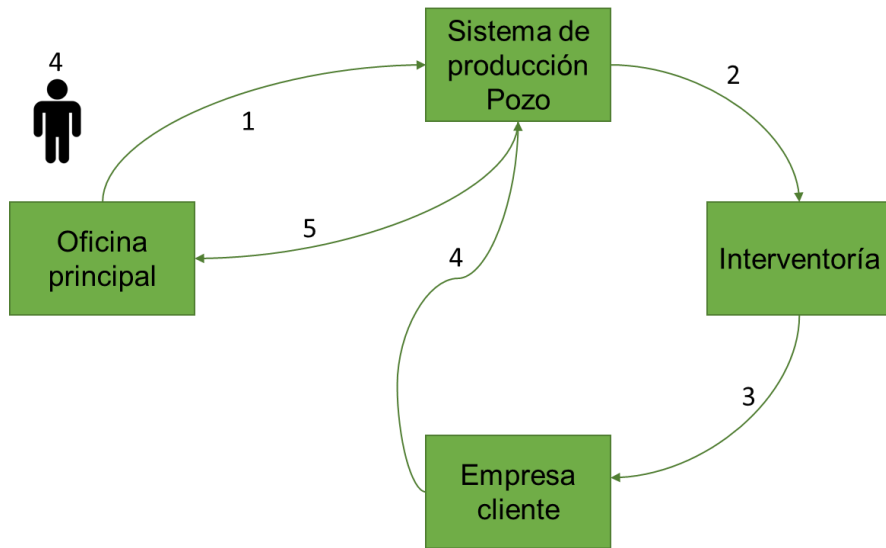
**Figura 16.** Desplazamientos actividades de mantenimiento preventivo Inicial



Fuente: Autor

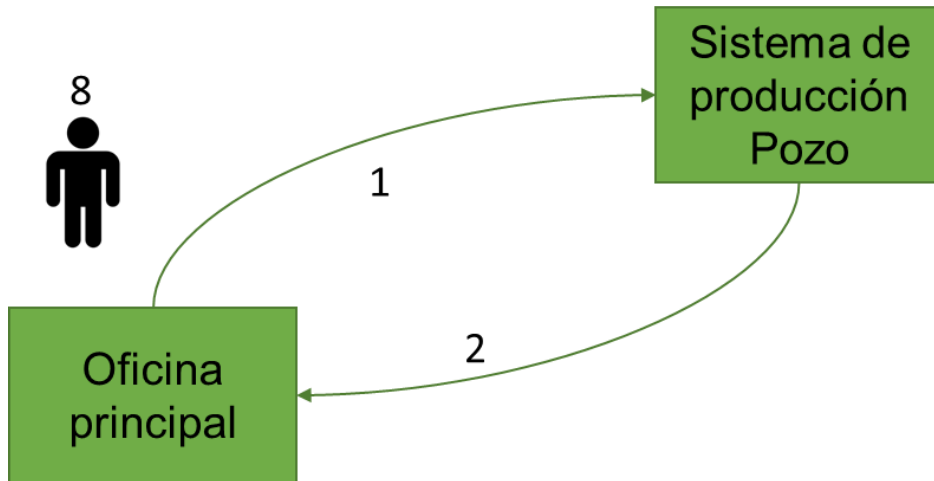
Para disminuir las horas-hombre en esta actividad, se realizó una reducción de los desplazamientos hacia la oficina y un desplazamiento hacía interventoría que se logra por medio de la programación para la entrega, revisión y firma de los permisos de trabajo con los involucrados en la interventoría y la empresa cliente. Esta actividad es realizada por máximo cuatro personas para que los demás integrantes de la cuadrilla realicen el alistamiento de equipos que representa el 5% de horas-hombre y una vez autorizado el permiso de trabajo, el desplazamiento de estas personas sea directo al pozo a intervenir, teniendo la ilustración de los desplazamientos en la Figura 17 para los trabajadores en el trámite del permiso de trabajo y la Figura 18 para el alistamiento de materiales.

**Figura 17.** Desplazamientos Permisos de Trabajo



Fuente: Autor

**Figura 18.** Desplazamientos Aislamientos



Fuente: Autor

## 2. Segundo Paso: Charla de seguridad

La actividad de charla de seguridad si bien es una actividad que no es generadora de valor directamente pues no está involucrada con la actividad propia del mantenimiento, no se puede excluir ya que hace parte junto con las condiciones óptimas de trabajo y los elementos de protección personal porque en estas se resalta la seguridad, salud en el trabajo y el trabajo decente<sup>36</sup>. Los tiempos reportados en los tres años tuvieron la segunda mayor disminución después del desplazamiento, registrándose esta información en la Tabla 39 y Figura 19 que también muestran la ecuación de la tendencia de los datos.

**Tabla 39.** Proyección de tiempo de Charla de Seguridad

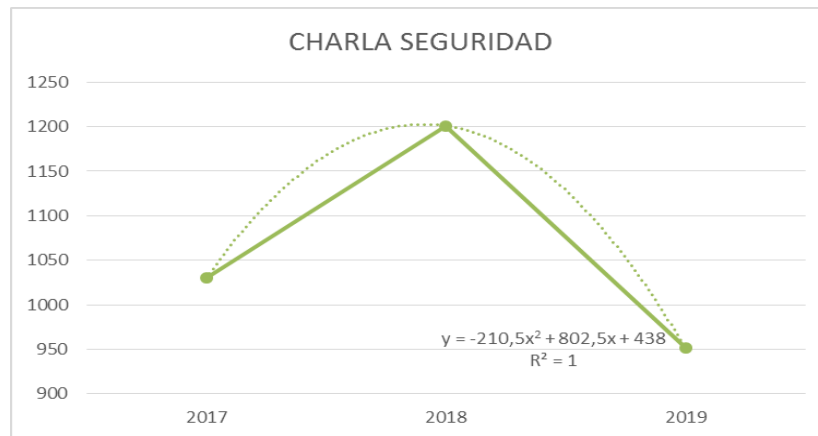
Ecuación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4 (Proyectado)
$y = -210,5x^2 + 802,5x + 438$	1031	1203	956	288

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 19.** Tendencia de Tiempos de Charla de Seguridad

---

<sup>36</sup> FIORP. La importancia de las charlas de seguridad en las empresas. En: Fundación Internacional ORP. Diciembre 2019. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://fiorp.org/la-importancia-de-las-charlas-de-seguridad-en-las-empresas/>



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

Para el siguiente periodo se espera alcanzar 288 horas anuales invertidas en las charlas de seguridad para lo cual se plantearon las siguientes estrategias:

- Espacios de charlas de seguridad: en la anterior estrategia, se organizó la cuadrilla de tal manera que un grupo se dirige a gestionar el permiso de trabajo y otro grupo organiza el alistamiento de los materiales. Para que la información de la charla de seguridad sea suministrada y se aprovechen las horas-hombres, el encargado de SST dará esta información en el espacio de espera de permisos de trabajo, en un espacio de tiempo durante el alistamiento de materiales o en los tiempos de inactividad por climatología adversa. Todos los días se debe dar esta información, sin embargo si pueden adelantar uno o dos temas cuando exista una espera prolongada, se realizará. Los temas deben ir al día, es decir, no se puede ir atrasado en temas porque son estos lo que crean la cultura de prevención y cuidado de la seguridad y salud.
- Organización semanal de los temas de seguridad y salud en el trabajo a tratar por día: el encargado de SST de la empresa, tendrá al inicio de la semana, los temas a tratar por día y realiza la actividad de socialización por separado a cada grupo de la cuadrilla. Los temas son acordes a los actos y

condiciones inseguras que se puedan presentar en las actividades de mantenimiento preventivo y según la zona en que se desarrollarán las labores.

### 3. Tercer Paso: Administración de la documentación

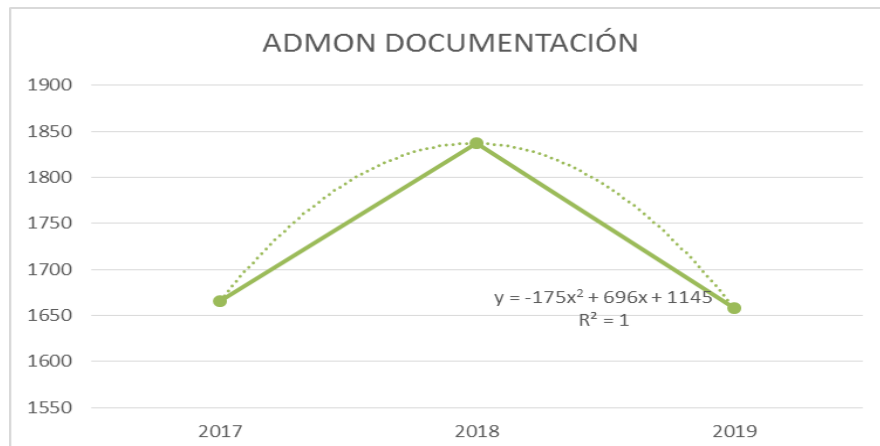
En las actividades de la industria de hidrocarburos en campo, se requiere cumplir con una serie de protocolos y estudiar las condiciones del terreno en el que se realizarán actividades, lo que implica la gestión de documentos en donde se registra la información de las características del área, el trabajo por hacer, los peligros y riesgos del terreno, el paso a paso para la intervención. A esto se le llama administración de la documentación que es requerida para el permiso de trabajo que posterior debe ser aprobado por la interventoría. Las horas-hombre invertidas en estas actividades han mejorado en las cuadrillas, teniendo el comportamiento que se presenta en la Figura 20 y que se proyecta para el año 4 de estudio llegue a 1129 horas-hombre, según la ecuación de tendencia presentada en la Tabla 40.

**Tabla 40.** Proyección de tiempo de Administración Documentación

Ecuación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4 (Proyectado)
$y = -175x^2 + 696x + 1145$	1666	1837	1658	1129

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 20.** Tendencia de Tiempos de Administración Documentación



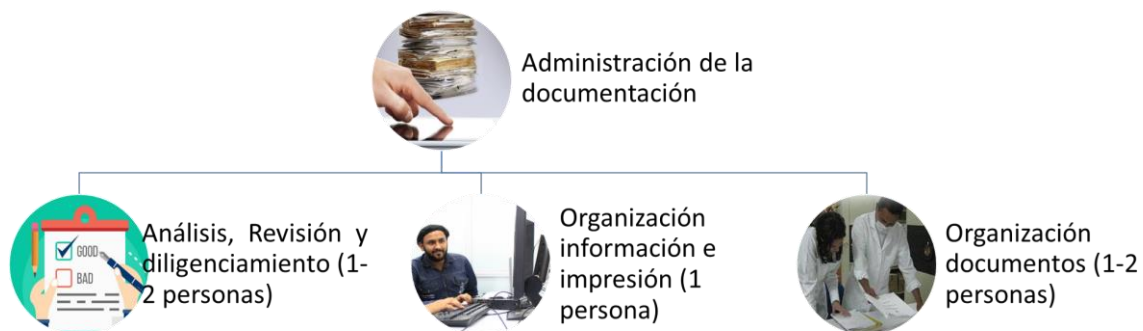
Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

Esta actividad consume el 24% del tiempo de las horas-hombre fuera del mantenimiento preventivo, por ende se debe desarrollar la estrategia de optimización de las horas-hombre invertidas en la documentación de los permisos de trabajo por medio de la distribución de dicha actividad entre las doce personas que conforman la cuadrilla. Al menos el 30-40% de los integrantes de la cuadrilla (3-5 personas), deben desarrollar habilidades y/o competencias para apoyar las labores administrativas implicadas en los mantenimientos preventivos para agilizar dicho proceso.

Las tareas se asignaron conforme se presenta a continuación y en la Figura 21:

- 1 o 2 personas en el análisis, revisión y diligenciamiento de los documentos requeridos
- 1 persona en el equipo de cómputo organizando y enviando a imprimir la información
- 1 o 2 personas organizando los documentos entre los encargados de revisión y la persona manejando el equipo de cómputo.

**Figura 21.** Equipo de Trabajo para la Administración de la Organización



Fuente: Autor

#### 4. Cuarto Paso: Espera de Permiso de Trabajo

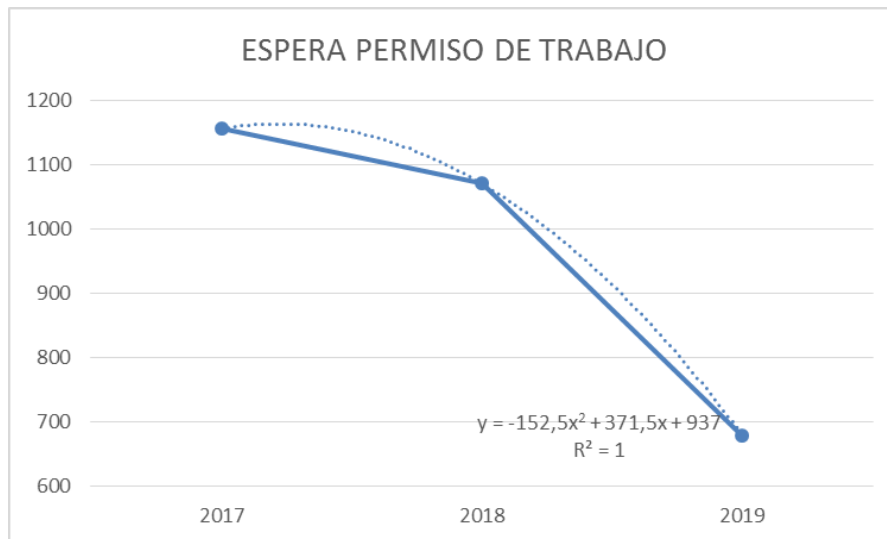
Las esperas en los permisos de trabajo, están en función de la disposición de las personas de interventoría para que revisen los documentos presentados por la empresa ejecutora. También, esta espera se condiciona a actividades previas que deben realizar otras cuadrillas para que se pueda intervenir el equipo. Los resultados de los tiempos reportados se muestran en la Figura 22 y en la Tabla 41 se presenta la proyección que en este caso se dejó en 3,5 debido a que el valor 4 arroja resultado negativo.

**Tabla 41.** Proyección de tiempo de Espera de Tiempo de Trabajo

Ecuación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4 (Proyectado)
$y = -152,5x^2 + 371,5x + 937$	1156	1070	679	369

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 22.** Tendencia de Tiempos de Espera Permiso de Trabajo



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

El tiempo de los permisos de trabajo, tiene comportamiento llegando a cero, porque se buscó suprimir esta espera, reemplazándola con la actividad de charla de seguridad y programando las reuniones con los encargados de la interventoría y la empresa cliente para evitar las esperas.

### **5. Quinto Paso: Apertura de Permisos de Trabajo**

La apertura de los permisos de trabajo hace referencia a las horas que se invierten en la validación final de la información, cuando en el sitio de trabajo no existe restricción y se encuentran verificadas todas las condiciones para intervenir siendo un procedimiento sencillo, que se ve afectado cuando son varias las personas de interventoría que deben firmar los documentos. Los tiempos reportados en los tres últimos años, son los que se presentan en la Tabla 42 y la línea tendencial en la Figura 23.

**Tabla 42.** Proyección de tiempo de Apertura de Permiso de Trabajo

Ecuación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4 (Proyectado)
$y = -48x^2 + 144x + 364$	460	460	364	172

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Figura 23.** Tendencia de Tiempos de Apertura de Permisos



Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

Las horas-hombre invertidas en la apertura del permiso de trabajo se optimizan por medio de la organización de la información en la Administración de la Documentación, haciendo que el proceso de revisión sea rápido para el interventor y en caso de existir observaciones y/o modificaciones, sean notificadas en el menor tiempo posible.

### 6.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROPUESTA

El análisis económico de la propuesta presentada se realizó tomando como referencia los valores reportados para el año 2019 de los ingresos operaciones recibidos, ingresos operacionales no recibidos y los costos de las horas-hombre invertidas en los mantenimientos preventivos. La propuesta del pilar de Mantenimiento Productivo Total de las actividades administrativas y de apoyo, obtuvo los resultados resumidos en la Tabla 43 para las actividades Pareto presentadas en el numeral 6.1.

**Tabla 43.** Resumen de Horas-hombre en Actividades de Mantenimiento Preventivo 2019 y Proyección

<b>Actividad</b>	<b>2019 Horas-hombre</b>	<b>(Proyección) Horas-hombre</b>	<b>Diferencia</b>
<b>Desplazamiento</b>	1.869	542	1.327
<b>Charla seguridad</b>	951	288	663
<b>Administración de la documentación</b>	1.658	1.129	529
<b>Espera permiso de trabajo</b>	679	369	310
<b>Apertura de permisos</b>	364	172	192
<b>Total</b>	<b>5.521</b>	<b>2.500</b>	<b>3.021</b>

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

La diferencia de tiempos con la propuesta realizada para las actividades Pareto, representa disminución en los costos de horas-hombre en el mantenimiento preventivo, como se refleja en la Tabla 44, datos anuales en donde se registró el costo de las horas-hombre para el año 2019 y el esperado según la proyección con las mejoras implementadas que representan el 50% de los costos del 2019, evidenciando que la organización y planificación de las actividades administrativas y de apoyo, pilar del mantenimiento productivo total, contribuyen positivamente en los costos del equipo a intervenir.

**Tabla 44.** Costo Horas-hombre en Mantenimiento Preventivo 2019 y Proyección

Actividad	Valor COP HH	Costo Horas-hombre en actividades previas mantenimiento preventivo		
		2019	Proyección	Disminución de costo
<b>Desplazamiento</b>	\$63.000	\$ 117.747.000	\$ 34.146.000	\$ 83.601.000
<b>Charla seguridad</b>	\$63.000	\$ 59.913.000	\$ 18.144.000	\$ 41.769.000
<b>Administración de la documentación</b>	\$63.000	\$ 104.454.000	\$ 71.127.000	\$ 33.327.000
<b>Espera permiso de trabajo</b>	\$63.000	\$ 42.777.000	\$ 23.247.000	\$ 19.530.000
<b>Apertura de permisos</b>	\$63.000	\$ 22.932.000	\$ 10.836.000	\$ 12.096.000
<b>Total</b>		\$ 347.823.000	\$ 157.500.000	\$ 190.323.000

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

El conocimiento de los nuevos ingresos operacionales que representa la aplicación de la propuesta descrita en el numeral 6.2, se realizó tomando el valor de diferencia de tiempos de la Tabla 43, con el tiempo de ciclo explicado en los numerales 3.1 y 3.2 en el modelo de Efectividad Global de Equipos, considerando que la propuesta permite que el equipo entre de nuevo en operación en un menor tiempo, para que los pozos continúen produciendo barriles de petróleo, valores registrados en la Tabla 45 para cada equipo (El Nuevo Tiempo Operativo es el resultado de las Horas-hombre Disminuidas sobre 12 que es la cantidad de personas por cuadrilla). Los ingresos operacionales percibidos con la propuesta presentada, se muestran en la Tabla 46.

**Tabla 45.** Barriles producidos con propuesta pilar TPM

Equipo	Tiempo de ciclo	Nuevo Tiempo	Barriles Nuevos
--------	-----------------	--------------	-----------------

<b>Mantenimiento</b>	<b>resultado (Horas/Bbl)</b>	<b>Operativo</b>	<b>Producidos</b>
<b>PCP</b>	0,13846	251,75	34,86
<b>BM</b>	0,14998	251,75	37,76
<b>FE</b>	0,14347	251,75	36,12

Fuente: Autor con Información suministrada campo Casabe – Ecopetrol S.A

**Tabla 46.** Ingresos operacionales con propuesta pilar TPM

<b>Equipo Mantenimiento</b>	<b>Barriles nuevos producidos</b>	<b>Precio promedio barril 2019 USD</b>	<b>Precio cierre dólar a 31 Diciembre 2019</b>	<b>Nuevos ingresos operacionales</b>
<b>PCP</b>	34	61,05	\$ 3.277	\$ 6.802.359
<b>BM</b>	37	61,05	\$ 3.277	\$ 7.402.568
<b>FE</b>	36	61,05	\$ 3.277	\$ 7.202.498
<b>Total</b>				<b>\$ 21.407.425</b>

Fuente: Autor

## 7 CONCLUSIONES

- El establecimiento del Modelo de Efectividad Global de los Equipos como medida inicial para el presente análisis económico, permitió tener en un solo indicador la relación de las variables fundamentales en la producción industrial como son la disponibilidad, rendimiento y calidad de la maquinaria y/o equipos, permitiendo conocer las actividades y tiempos que impiden que se llegue al 100% ideal, teniendo para el año 2019 un mejor desempeño al alcanzar 96,68 en PCP, 96,52 para Bombeo mecánico y 97,05 para facilidades eléctricas.
- El tiempo de ciclo se convirtió en la medida de referencia para medir el impacto operacional en barriles, cada vez que se presenten tiempos muertos o no generadores de valor durante las actividades de mantenimiento preventivo o cualquier otra actividad durante el proceso productivo.
- El enfoque en los barriles no producidos en el análisis económico de la productividad de las horas-hombres en las actividades de mantenimiento preventivo, dio un direccionamiento de mejoramiento continuo buscando que entre cada periodo, los barriles no producidos sean menores y así el equipo produzca mayor cantidad para generar ingresos operacionales, reportando así para el año 2019 una variación de 38,3% y 42,3% con respecto a los barriles no producidos del año 2018.
- El análisis económico de los barriles producidos y no producidos, permitió tener un enfoque en donde se lograra vincular directamente el rendimiento sostenido del equipo con la rentabilidad del pozo, puesto que se logró para el año 2019 con las mejoras implementadas en productividad de las horas-hombre, la generación de \$652.876.939 adicionales de ingresos operacionales empleando la misma cantidad de trabajadores.

- La caracterización de los tiempos de inactividad de los sistemas de producción, dio a conocer el costo de la mano de obra que interviene en el mantenimiento preventivo, obteniendo el análisis económico de la Efectividad Global de los Equipos.
- La productividad parcial de las horas-hombre en los mantenimientos preventivos en función de los ingresos operacionales mostró la contribución de estas actividades en la generación de valor para el Campo Casabe.
- La baja rotación de trabajadores en determinada actividad, mostró que cuando se tiene la experiencia, se convierte en un activo importante en este caso en las actividades de mantenimiento puesto que se ejecutan en menor tiempo, siendo más productivos al pasar de \$2.322.180.076 ingresos operacionales por trabajador a generar \$2.376.586.488, representando un aumento de \$54.406.412 de ingresos operacionales por trabajador al año.
- El seguimiento de los ingresos operacionales generados y el costo de la mano de obra involucrada en los mantenimientos preventivos, permitió identificar aquel cuya inversión fue más rentable, contribuyendo en la toma de decisiones frente a los sistemas de producción que para este caso se tienen las facilidades eléctricas el que representa el 50% de los ingresos con \$14.292.134.377, seguido por PCP con \$8.046.866.371 siendo el 28% y finalmente bombeo mecánico con \$ 6.180.037.107 siendo el 22%.
- El análisis de las actividades previas a los mantenimientos preventivos por medio del diagrama Pareto, contribuyó a detectar aquellas en las que se tuvo mayor inversión para así organizar la propuesta en función de dichas actividades y generar un impacto en el consumo de horas-hombre que se traduce en disminución de costos o eficiencia de recursos, que para el caso presentado se detectaron las actividades de desplazamiento, administración de la documentación y la charla de seguridad las que acumulan más del 60% del tiempo improductivo de los trabajadores de mantenimiento preventivo.

- La organización, distribución y programación de las actividades administrativas y de apoyo que describe el Pilar del Mantenimiento Productivo Total, evidenciaron que tienen un aporte importante porque permiten la ejecución de los mantenimientos sin retrasos y sin dejar a un lado el cumplimiento de los protocolos administrativos y de seguridad, representando la mejora que se presentó con resultados positivos como el aumento de los ingresos operacionales en \$652.876.939 tras producir más barriles de petróleo.
- La organización de la mano de obra que interviene en los mantenimientos preventivos de los sistemas de producción, representó optimización del costo de intervención, demostrando que la aplicación del pilar del Mantenimiento Productivo Total enfocado en las actividades administrativas y de apoyo, tiene impacto en los costos de operación.

## BIBLIOGRAFÍA

ALGARRA, Ivonne y SIERRA, Cristian. Estudio de la efectividad global de los equipos (OEE) y propuesta de mejoramiento basada en el uso de herramientas de manufactura esbelta en la empresa Inemflex S.A.S. Trabajo de grado Profesional Ingeniería Industrial. Bogotá: Universidad Agustiana. Facultad de Ingenierías. Ingeniería Industrial, 2018. 31p

BAIN, D. Productividad: la solución a los problemas de la empresa (No. HD56. B34 1992.). México, DF: McGraw-Hill, 1985.

BEN OR, Yaniv. Measuring For Improvement: A study of production processes' effectiveness and the potential for improvements at Nobel Biocare. Karlstad. 2010. p 1-128. [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:346624/FULLTEXT01.pdf>

CARRO PAZ, Roberto y GONZÁLEZ, Daniel. Productividad y Competitividad. Buenos Aires: Alfa & Omega, 2013. vol. 1 [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: [https://www.academia.edu/download/55993832/02\\_productividad\\_competitividad.pdf](https://www.academia.edu/download/55993832/02_productividad_competitividad.pdf)

CEQUEA NULL, M. M y RODRÍGUEZ MONROY, C. Productividad y factores humanos. Un modelo con ecuaciones estructurales. En: *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*. Febrero 2012. vol. 37 no 2., p. 121-127.

CRUELLES RUIZ, José. La teoría de la medición del despilfarro. 2 ed. Toledo: Artef, SL, 2010. 103p. ISBN 978-84-613-5716-1

FIORP. La importancia de las charlas de seguridad en las empresas. En: *Fundación Internacional ORP*. Diciembre 2019. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://fiorp.org/la-importancia-de-las-charlas-de-seguridad-en-las-empresas/>

GONZÁLEZ, José y RODRÍGUEZ, Myriam. Gestión del conocimiento, capital intelectual e indicadores aplicados. 1 ed. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2017. 92p. ISBN: 978-84-9969-612-6

HERNÁNDEZ, Roberto; FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. Metodología de la investigación. 6 ed. México: McGraw-Hill, 2010. 10p.  
HERRERA, Fabio, et al. Fundamentos de análisis económico: guía para investigación y extensión rural. Costa Rica: Bib. Orton IICA/CATIE, 1994. No. 232.

<https://actualicese.com/tasa-representativa-del-mercado-al-31-de-diciembre-de-2019-queda-en-3-27714/>

<https://lta.reuters.com/articulo/mercados-petroleo-sondeo-idLTAKCN1OU0J5>

JILCHA, Kassu y KITAW, Daniel. Lean influence on occupational safety and health in manufacturing industries. En: *Global Journal of Research In Engineering*. 2016. vol. 16. p 1-8. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1446/1377>

LAZIM, Halim y RAMAYAH, T. Maintenance strategy in Malaysian manufacturing companies: a total productive maintenance (TPM) approach. En: *Business Strategy Series*. 2010. p 2. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Halim\\_Lazim/publication/241675292\\_Maintenance\\_strategy\\_in\\_Malaysian\\_manufacturing\\_companies\\_A\\_total\\_productive\\_maintenance\\_TPM\\_approach/links/55fcc7c008ae07629e13e8ff/Maintenance-strategy-in-Malaysian-manufacturing-companies-A-total-productive-maintenance-TPM-approach.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Halim_Lazim/publication/241675292_Maintenance_strategy_in_Malaysian_manufacturing_companies_A_total_productive_maintenance_TPM_approach/links/55fcc7c008ae07629e13e8ff/Maintenance-strategy-in-Malaysian-manufacturing-companies-A-total-productive-maintenance-TPM-approach.pdf)

LLERAS, Jose y REDONDO, Jesus. Diseño de un sistema de gestión basado en la metodología de mantenimiento productivo total (TPM) para una empresa de alquiler. Trabajo de grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2019. 43p

MARCHANTE, Andres y ORTEGA, Bienvenido. Capital humano, desajuste educativo y productividad del trabajo: un estudio para la industria hotelera. En: *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*. 2010. vol. 13, no. 44, p. 79-100. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1138575810700207>

MORA A. Mantenimiento industrial efectivo. Envigado: Editorila Cold i, 2014. p 26 - 44.

MORALES, Cristina. MASIS, Alejandro. La medición de la productividad del valor agregado: una aplicación empírica en una cooperativa agroalimentaria de Costa Rica. TEC empresarial. Volumen 8. Número 2. 2014. p.p 41-49 [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/te.v8i2.1988>

PEIMBERT-GARCÍA, Rodrigo; BERUVIDES, Mario; GARCÍA-HERNÁNDEZ, Diana. An economic framework for total productive maintenance (TPM). En: *IIE Annual Conference. Proceedings*. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE). Mayo 2012. p 2. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/289050081\\_An\\_Economic\\_Framework\\_for\\_total\\_productive\\_maintenance\\_TPM](https://www.researchgate.net/publication/289050081_An_Economic_Framework_for_total_productive_maintenance_TPM)

PINTELOS Y GELDERS, 1992 citado por Márquez y Mora, Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos. INGEMAN, 2012. p14.20

PROKOPENKO, J. (1989). La gestión de la productividad. Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo, 1989.

RAMREDDY, B y CHOUDHARY, D. Enhancement of The Performance of an Industry By The Application of TQM Concepts. En: *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Octubre 2013. vol. 02, no. 10, p. 410-420. [En línea] [Consultado mayo de 2020]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.684.3229&rep=rep1&type=pdf>

SCHIRALD, Massimiliano. Operations Management. 1 ed. Rijeka: Intech, 2013. 36p. ISBN 978-953-51-1013-2

SCHUMPETER, J. A, et al. Historia del análisis económico. Barcelona: Ariel, 1971. [www.slb.com/resources/.../oilfield\\_review.aspx](http://www.slb.com/resources/.../oilfield_review.aspx). Amaya, Mauro. Ecopetrol S.A. 2013

YILMA, Y. KITAW.D. MATEBU. A. Development of Productivity Measurement and Analysis Framework for Manufacturing Companies. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. Número 22. 2017. p.p 1-13. [En línea] [Consultado marzo de 2020]. Disponible en: [http://www.qjie.ir/article\\_274\\_14013af42811e68ef3b6c94bb3cee223.pdf](http://www.qjie.ir/article_274_14013af42811e68ef3b6c94bb3cee223.pdf)

## ANEXOS

Anexo A. Modelo para el Análisis Económico del Factor de Productividad Horas-Hombre en las Actividades de Mantenimiento Preventivo a las Unidades de Bombeo Mecánico, PCP y Facilidades Eléctricas de los Pozos Productores de Campo Casabe

	Equipo Mantenimiento	PCP		BM		FE	
		ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
<b>DATOS INICIALES</b>	<b>CANTIDAD POZOS</b>	<b>179,000</b>	<b>179,000</b>	<b>70,000</b>	<b>70,000</b>	<b>249,000</b>	<b>249,000</b>
	<b>Prod Neta (Bopd)</b>	<b>10.342</b>	<b>10.342</b>	<b>3.734</b>	<b>3.734</b>	<b>14.076</b>	<b>14.076</b>
	Cantidad Pozos intervenidos mantenimiento preventivo mensual	24	24	20	20	44	44
	N° Trabajadores	12	12	12	12	12	12
	Horas al día	8	8	8	8	8	8
	Días laborales	24	24	24	24	24	24
	Total Horas Hombre	2.304	2.304	2.304	2.304	2.304	2.304
	Valor Hora Hombre COP	63.000	63.000	63.000	63.000	63.000	63.000
	Valor Total Horas Hombre COP	145.152.000	145.152.000	145.152.000	145.152.000	145.152.000	145.152.000
	Precio promedio barril 2019 USD	61,050	61,050	61,050	61,050	61,050	61,050
	Precio cierre dólar a 31 Diciembre 2019	3.277,14	3.277,14	3.277,14	3.277,14	3.277,14	3.277,14
	Prod Neta Promedio (Bopd) 24 pozos	1.386,69	1.386,69	1.066,79	1.066,79	2.453,48	2.453,48
	Prod Neta Promedio Mensual 24 pozos	41.600,696	41.600,696	32.003,717	32.003,717	73.604,413	73.604,413
	Horas inactivo pozos mensual mantenimiento preventivo	250	144	230	120	480	264
	Diferida mensual promedio 24 pozos	602	347	511	267	1.113	614
	Tiempo disponible equipo	5.760	5.760	4.800	4.800	10.560	10.560
	Tiempo de ciclo (Horas/barril)	0,138	0,138	0,150	0,150	0,143	0,143
	Capacidad nominal (Barriles/Hora)	7,222	7,222	6,667	6,667	6,970	6,970
	Horas Inactivos en actividades improductivas Mantenimiento preventivo	59,521	47,118	59,521	47,118	59,521	47,118
	Tiempo Operativo	5.510	5.616	4.570	4.680	10.080	10.296
Tiempo producción real	5.450,479	5.568,882	4.510,479	4.632,882	10.020,479	10.248,882	
<b>BARRILES NO PRODUCIDOS</b>	Barriles no producidos por actividades improductivas Mantenimiento preventivo	429,880	340,303	396,852	314,157	414,867	328,418
	Barriles no producidos por mantenimiento Preventivo	1.805,586	1.040,017	1.533,511	800,093	3.345,655	1.840,110
	Total Barriles no producidos	2.235,466	1.380,320	1.930,363	1.114,250	3.760,522	2.168,529
	Ingresos operacionales no percibidos	447.248.264,512	276.159.823,375	386.206.580,448	222.927.283,070	752.365.408,344	433.856.208,045
<b>PRODUCCIÓN REAL</b>	Producción real con mantenimiento, con trámites (Barriles)	39.365,231	40.220,376	30.073,354	30.889,467	69.843,891	71.435,885
	Ingresos operacionales mensual COP	7.875.777.930	8.046.866.371	6.016.757.810	6.180.037.107	13.973.625.177	14.292.134.377
<b>OEE</b>	Disponibilidad	0,957	0,975	0,952	0,975	0,955	0,975
	Rendimiento	0,989	0,992	0,987	0,990	0,994	0,995
	Calidad	1	1	1	1	1	1
	<b>OEE TOTAL</b>	<b>94,626</b>	<b>96,682</b>	<b>93,968</b>	<b>96,518</b>	<b>94,891</b>	<b>97,054</b>
<b>PRODUCTIVIDAD</b>	Barriles no producidos por trabajador	186,289	115,027	160,864	92,854	313,377	180,711
	Barriles no producidos por HH Mantenimiento	0,970	0,599	0,838	0,484	1,632	0,941
	Productividad Parcial 1 (Mensual) Ingresos/N° Trabajadores	656.314.827,50	670.572.197,60	501.396.484,17	515.003.092,29	1.164.468.764,73	1.191.011.198,08
	Productividad Parcial 2 (Mensual) Ingresos/Horas Hombre	3.418.306,393	3.492.563,529	2.611.440,022	2.682.307,772	6.064.941,483	6.203.183,323
	Productividad Parcial 3 (Mensual) Ingresos/COP Horas Hombre	54,259	55,438	41,451	42,576	96,269	98,463
	<b>Δ Productividad</b>	<b>38,254</b>		<b>42,278</b>		<b>42,334</b>	