

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LOS SISTEMAS
DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA EMPRESA AGUAS DE
CARTAGENA E.S.P.**

**JOSÉ ANTONIO MILANÉS SALAS
WILMER ANTONIO FLOREZ HERRERA**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.**

2020

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LOS SISTEMAS
DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA EMPRESA AGUAS DE
CARTAGENA E.S.P.**

**JOSÉ ANTONIO MILANÉS SALAS
WILMER ANTONIO FLÓREZ HERRERA**

Trabajo de Grado para optar al título de profesional en Ingeniería Industrial

DIRECTOR

**JAVIER ALVAREZ OROZCO
ADMINISTRADOR INDUSTRIAL**

**RAFAEL UGARRIZA
INGENIERO INDUSTRIAL**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.**

2020

NOTA DE ACEPTACION

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena 30 de mayo de 2020

DEDICATORIA

José Milanés:

Dedico este proyecto de investigación a nuestros familiares, especialmente a: Mis hijos Dante Rafael Milanés Barón, Lila Marcela Milanés Barón, a mi esposa Katia Lila Barón Bravo, ellos que fueron mi motor para seguir adelante en este camino y alcanzar una nueva meta, ellos hicieron parte de este sacrificio para ir conquistando día a día, a pesar de las adversidades de tiempo y compromisos un nuevo logro en nuestras vidas.

Wilmer Flórez:

Dedico es proyecto de investigación a mi familia y principalmente a mi madre María T. Herrera, mi hermana Diana Matta Herrera, que me han brindado todo su apoyo en todo mi proceso de estudio y dándome su apoyo incondicional. A la vez también agradezco a mis compañeros de estudios en especial a Wendy Carrasquilla, gran compañera que nos mantuvo en la moral alta para conseguir este logro en la vida.

A nuestros padres Martha Cecilia Salas De Oro, Rafael De Jesús Milanés García, María Trinidad Herrera, seres que con el más infinito amor siempre nos motivaron a seguir adelante y nunca mirar atrás.

AGRADECIMIENTO

Primero que todo queremos darles gracias a Dios por permitirnos llegar esta etapa de nuestro camino académico y profesional.

A nuestros padres que desde nuestra existencia siempre fueron ejemplo de lucha, sacrificio y perseverancia, nos levantaron con los valores que nos permitieron llegar a esta meta propuesta.

A nuestros directores de trabajo Javier Álvarez Orozco y Rafael Ugarriza que nos impulsaron y guiaron en la elaboración de esta investigación, ellos siempre con la más amplia disposición y humildad para transmitirnos sus amplios y valiosos conocimientos; a nuestros demás profesores que llenos de paciencia y amor por el arte del conocimiento y la educación siempre nos brindaron su más sincero esfuerzo por enseñarnos.

Queremos agradecer a nuestra Alma Mater la Universidad Antonio Nariño por brindarnos la oportunidad de ser no solo unos profesionales sino también unas mejores personas, a todo el plantel humano de la universidad gracias por sus disposición y colaboración a todo momento.

Gracias a todos y que Dios los bendiga.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPITULO 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. Objetivo General	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	17
CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIAL.....	19
2.1. MARCO REFERENCIAL	19
2.2. MARCO TEÓRICO	21
2.3. MARCO LEGAL.....	32
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	34
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
3.2. HIPÓTESIS.....	34
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	34
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	34
3.5. PROCESO METODOLÓGICO	35
3.6. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	36
3.7. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	36

CAPÍTULO 4: REVISIÓN DE RESULTADOS FRENTE A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
4.1. DESARROLLO DEL OBJETIVO ESPECIFICO N°1	37
4.1.1. Análisis del funcionamiento de las Estaciones	37
4.1.2. Análisis causa raíz mediante la herramienta Árbol lógico de fallas	43
4.2. DESARROLLO DEL OBJETIVO ESPECIFICO N°2	46
4.2.1. Cálculo de Criticidad	50
4.2.2. Matriz de criticidad de Procesos.....	51
4.3. DESARROLLO DEL OBJETIVO ESPECIFICO N°3	54
4.3.1. Grupos de Estaciones según su criticidad	55
4.3.2. Tipo de sistema operativo de las Estaciones	55
4.3.3. Zonificación de las Estaciones	56
4.3.4. Cronograma de mantenimiento de las estaciones	61
4.3.5. Beneficios del Cronograma de Mantenimiento.....	64
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN	65
5.1. CONCLUSIONES	65
5.2. RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Factores ponderados.....	27
Ilustración 2 -Modelo de Matriz de Criticidad	31
Ilustración 3 - Flujograma de la Investigación	35
Ilustración 4 . Diagrama de Pareto de fallas Estaciones de Tratamiento.....	42
Ilustración 5 - Árbol Lógico de Fallas Sistema de Cloración	44
Ilustración 6 – Criterios y Cuantificación de Frecuencias y Fallas.	47
Ilustración 7 -Matriz de Criticidad.....	52
Ilustración 8 - Estaciones de la zona A.....	57
Ilustración 9 - Estaciones de la zona B	57
Ilustración 10 - Estaciones de la zona C	58
Ilustración 11 - Estaciones de la zona D.....	59
Ilustración 12 - Estaciones de la zona E	59
Ilustración 13 - Estaciones de la zona F	60
Ilustración 14 - Estaciones de la zona G.....	60
Ilustración 15 - Cronograma de Mantenimiento de las Estaciones	62

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 - Ejemplo de Frecuencias de Fallas	28
Tabla 2 - Ejemplo de Impacto Operacional	28
Tabla 3 - Ejemplo de Flexibilidad Operacional.....	29
Tabla 4 - Ejemplo de Costos de Mantenimiento	29
Tabla 5 - Ejemplo de Impacto S.A.H.....	30
Tabla 6 - Costos de Horas extras	40
Tabla 7 – Análisis de Fallas	41
Tabla 8 - Procesos con mayor N° de falla.....	43
Tabla 9 - Frecuencia de Fallas.....	48
Tabla 10 - Impacto Operacional.....	48
Tabla 11 - Flexibilidad Operacional.....	49
Tabla 12 - Costos de Mantenimiento	49
Tabla 13 - Impacto S.A.H.....	50
Tabla 14 - Resultados del Cálculo de Criticidad	51
Tabla 15 - Estaciones Críticas por el proceso de Dosificación	52
Tabla 16 - Estaciones Críticas por el proceso de Bombeo	53
Tabla 17 - Estaciones Críticas por el proceso de Monitoreo.....	53
Tabla 18 - Tipo de sistema operativo de las Estaciones	56

RESUMEN

Está demostrado que las organizaciones actualmente buscan un eficiente sistema de mantenimiento para evitar paradas en su producción o en la prestación de servicio ya que le genera una pérdida monetaria e insatisfacción de los clientes. La evolución de la actividad de mantenimiento debe verse, en primera instancia, como la adopción de un sistema que se acople a las necesidades de cada empresa y particularmente a las características y el estado técnico de los equipos y maquinarias instaladas en ellas.

El trabajo se realizó en la empresa Aguas de Cartagena E.S.P. La investigación tiene como finalidad diseñar un Plan de Mantenimiento Preventivo en los sistemas Instrumentación implementados en las estaciones de tratamiento mediante un cronograma de trabajo que contenga la priorización de las estaciones, el cual se desarrollará con la información obtenida de la empresa, identificando las principales causas que afecta la ejecución de los manteamientos preventivos mediante un análisis RCM y la criticidad de las estaciones que requieren más control y mantenimiento.

Finalmente, se obtendrían los parámetros y requerimientos principales para el plan, tales como: indicadores de tiempo medio entre falla, tiempos de intervención y solución de los correctivos generados, la medición de la productividad de los recursos humanos y costos de producción.

Palabras claves: Análisis RCM, Indicadores de Tiempo Medio entre fallas, Mantenimiento Preventivo y Correctivo, Productividad.

ABSTRACT

It is proven that organizations are currently looking for an efficient maintenance system to avoid downtime in their production or service provision and that generates a monetary loss and customer dissatisfaction. The evolution of the maintenance activity must, in the first instance, be the adoption of a system that matches the needs of each company and specifically the characteristics and technical status of the equipment and machinery installed in them.

The work was done in the company Aguas de Cartagena E.S.P. The purpose of the research is to design a Preventive Maintenance Plan in the systems Instrumentation implemented in the treatment stations through a work schedule that contains the prioritization of the stations, which is developed with the information obtained from the company, identifying the main causes that affects the execution of preventive maintenance through a CRM analysis and the criticism of the stations that have more control and maintenance.

Finally, the main parameters and requirements for the plan will be obtained, such as: indicators of average time between failures, intervention times and solution of the corrections generated, the measurement of the productivity of human resources and production costs.

Keywords: RCM Analysis, Average Time Indicators Between Failures, Preventive and Corrective Maintenance, Productivity.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento preventivo en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento, distribución de agua potable y alcantarillado, constituyen acciones que debieran ser consideradas rutinarias, sin embargo, tienden a ser postergadas ante la falta de insumos o presupuesto para ejecutarlas. Es donde el mantenimiento preventivo juega un papel muy importante y lo planteado por (Garrido, 2009) “este configura un conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones industriales en servicio durante el mayor tiempo posible, buscando la más alta disponibilidad y con el máximo rendimiento.”

En el caso de las empresas que tienen como producto el tratamiento y conducción de las aguas urbanas, las tareas han sido correctivas, dedicando todo su esfuerzo a solucionar las fallas que se producían en los equipos y desarrollando nuevos métodos de trabajo que hicieron avanzar las técnicas de mantenimiento en varias vertientes: en la robustez del diseño, a prueba de fallos y que minimice las actuaciones de mantenimiento; en el mantenimiento por condición, como alternativa al mantenimiento sistemático; y en el análisis de fallos, tanto los que han ocurrido como los que tienen una probabilidad tangible de ocurrencia de fallos potenciales.

En la actualidad, con el uso de las técnicas de información y comunicaciones, el mantenimiento se desarrolla apoyado en la fiabilidad, como estilo de gestión basado en el estudio de los equipos, en análisis de los modos de fallo y en la aplicación de técnicas estadísticas y tecnología de detección. Esto no solamente permite detectar fallas y posibles colapsos en el sistema, sino orientar un criterio de atención en todos los equipos del proceso que permita anticipar los posibles colapsos que puedan ir presentándose a lo largo de la vida útil de los equipos.

La investigación tuvo como objetivo estudiar la realidad de la automatización en el sector Industrial de Cartagena, basado en la experiencia de la Empresa Aguas de Cartagena, dedicada a la prestar los servicios de Acueducto y Alcantarillado, cuenta con 78 estaciones de bombeo y cada una con equipos de instrumentación de excelente calidad y continuidad, incorporando modernas tecnologías en su operación, con una gran recuperación y crecimiento de su infraestructura.

El objetivo principal de este trabajo se basó en diseñar un plan de mantenimiento en los sistemas de instrumentación y control en función de la criticidad de las estaciones de tratamiento logrando así la reducción de las fallas en los equipos, para ello se realizó un diagrama de Pareto para identificar el 20% de las fallas que causaban el 80% de los mantenimientos correctivos ejecutado por el personal de

Acuacar, con esto se identificó que la falla más representativa fue en el sistema de cloración, por tanto, se determinó por medio de un árbol lógico de fallas unas recomendaciones para la eliminación de las fallas latentes.

Luego de ellos desarrollo el modelo de criticidad de factores ponderados para determinar las estaciones más críticas del sistema de Acuacar y así plantear el plan de mantenimiento preventivo idóneo para ello.

CAPITULO 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La empresa Aguas de Cartagena está dedicada a la prestar los servicios de Acueducto y Alcantarillado, cuenta con 78 estaciones de tratamiento y cada una con equipos de instrumentación de excelente calidad y continuidad, incorporando modernas tecnologías en su operación, con una gran recuperación y crecimiento de su infraestructura.

En cuanto al uso de la informática para el manejo de todos los datos que se abordan en las acciones de mantenimiento, entiéndase órdenes de trabajo, gestión de las actividades preventivas, gestión de materiales, control de costes, entre otras, se busca tratar todos estos datos y convertirlos en información útil para la toma de decisiones.

Hoy día se menciona la “Gestión del Mantenimiento Asistido por Computadora” (GMAC), o sus siglas en inglés CMMS (Computerised Management Maintenance System). Es un avance y tecnificación que se hace necesario abordar para la programación del mantenimiento preventivo en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento, distribución de agua potable y alcantarillado, en el caso de la empresa Aguas de Cartagena E.S.P., visualizando la problemática desde una postura que permita internalizar la realidad operativa de las máquinas o equipos, en su temporalidad de uso y desgaste, para prevenir colapsos que terminen por paralizar el desarrollo armonioso de las actividades de servicio de la empresa Aguas de Cartagena E.S.P. A partir de este modelo, el análisis de las producciones y la importancia de la ejecución del mantenimiento en los procesos significó el estudio en el mejoramiento continuo en la planeación de los mantenimientos para la optimización de los procesos y la vida útil de los equipos.

En la actualidad, el mantenimiento está tan estructurado que intervienen una cantidad de factores que representan los engranajes en el desarrollo de un plan de mantenimiento, como lo muestra el mantenimiento productivo total y el mantenimiento centrado en la confiabilidad, que además de los equipos, intervienen los sistemas, los diseños, capacitaciones, actitudes, aptitudes y los recursos humanos implícitos en los procesos.

A raíz de ir en búsqueda de la fiabilidad de los procesos, equipos y su mejoramiento continuo se quiere atacar la problemática que se encuentra en la empresa Aguas de Cartagena en sus sistemas de instrumentación y control. Dicho abordaje se debe

a que el mantenimiento, está centrado en la sugerencia dada por los fabricantes de los instrumentos y equipos que intervienen en los procesos operativos, la empresa ha establecido que los mantenimientos se realicen de acuerdo a la criticidad de las estaciones y la afectación de los indicadores de disponibilidad y confiabilidad de los equipos que se ha evidenciado una desmejora significativa en la medición de las variables de presión, nivel y caudal en cada una de las estaciones.

Según los datos recolectados en la empresa, la periodicidad del mantenimiento es de ir a cada estación cada 15 días, y por día se debería hacer las visitas de 6 estaciones, pero esto no se cumple porque hay unas estaciones que requieren más tiempo por la cantidad de equipos y la distancia entre ellas; además que algunas veces no se cuenta con los insumos para realizar un cambio, generando fallas significativas en las estaciones de tratamiento, por tanto, el mantenimiento según (Duran, 2003) “está caracterizado por la búsqueda continua de tareas que permitan eliminar la ocurrencia de fallas imprevistas y/o reparaciones” que generan una parada forzosa en las estaciones.

Con estos indicadores se evidencia que la empresa un alto índice de fallas en los equipos de las estaciones lo cual ocasiona que se atiendan unas estaciones más que otras por la criticidad de estas.

El exceso o escaso mantenimiento por equipo para su funcionamiento, sobre costo de los insumos de mantenimiento, el tiempo de ejecución Hombre-Máquina, la disposición en el tiempo por equipo detenido, la distribución del tiempo y las distancias entre cada estación.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál sería el plan de mantenimiento preventivo adecuado que permitiría la reducción de las fallas y aumento de la producción en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento, distribución de agua potable y alcantarillado de la empresa Aguas de Cartagena E.S.P.?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo en los sistemas de instrumentación y control en función de la criticidad de las estaciones de tratamiento logrando así la reducción de las fallas en los equipos y aumento de la productividad en Empresa Aguas de Cartagena E.S.P.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Diagnosticar el mantenimiento correctivo en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento mediante un análisis de causa raíz estableciendo así las principales causas de las fallas presentadas.
2. Determinar la priorización de los procesos más afectados mediante un modelo de criticidad de factores ponderados identificando así las estaciones de tratamiento que requieren más control y mantenimiento.
3. Diseñar un plan de mantenimiento preventivo en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento mediante un cronograma de trabajo teniendo en cuenta la priorización logrando así la reducción de los tiempos medios entre las fallas y los tiempos de solución.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Debido a la gran importancia que tienen las estaciones de tratamiento en la empresa según (Ticlavilca, 2016) “es necesario garantizar el buen funcionamiento y operatividad constante de los equipos en ellas, para así asegurar el correcto desempeño de la empresa y evitar paradas forzadas en los procesos” entre ellos la distribución del agua. Igualmente, los costos que incurren en las fallas presentadas en las estaciones suelen ser altos y requieren que el personal que se encuentra destinado para hacer otras labores tengas que trabajar en las fallas y, por ende, se dejan de realizar otro tipo de mantenimientos necesarios.

Es por eso por lo que la empresa debe contar con un plan de mantenimiento preventivo en el cual se desarrolle por la criticidad de las estaciones y poder tener una gran cobertura en las 78 estaciones generando un alto índice de confiabilidad y disponibilidad de los equipos; además incrementado la productividad por la reducción del índice de fallas.

Así mismo, en un aspecto puntual, la implementación del nuevo plan de mantenimiento que gire en torno a los modelos matemáticos inducirá a establecer que el mantenimiento productivo total (MPT), el mantenimiento predictivo y el mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) junto con todos los datos estadístico de las fallas y la asistencia de todos los equipos serán las herramientas para poder programar el nuevo mantenimiento para todo el sistema.

En cuanto al objetivo planteado del proyecto que es diseñar un plan mantenimiento preventivo, se busca: aumentar la vida útil de los equipos e instalaciones; aumentar la confiabilidad del equipo, reduciendo así la probabilidad de interrupciones en el servicio y reduciendo los costos de tiempo de inactividad y mejorando la disponibilidad; mejorar la eficiencia y productividad del trabajo, reduciendo y optimizando la carga del mismo; reducir los tiempos de inactividad en caso de revisión o avería; prevenir y anticipar costosas intervenciones de mantenimiento correctivo; mejora en la toma de decisiones, por ejemplo, nos permite decidir sobre el mantenimiento correctivo en buenas condiciones, así mismo evitar grandes consumos de energía, lubricantes, entre otras; mejorar las condiciones laborales del personal de producción; y reducir el presupuesto de mantenimiento, aumentar las ventas y los beneficios de la empresa.

El aporte de este trabajo a la presente investigación radica en identificar en forma detallada la Empresa Aguas de Cartagena, delimitando su proceso industrial y el nivel de automatización que hace posible percibir los avances que la empresa tiene en dicho campo para, de esta manera, estar al tanto de tecnologías utilizadas y de sus necesidades en automatización. Lo anterior muestra desde una postura del

análisis crítico cómo están las condiciones de Aguas de Cartagena, conocer las falencias y fortalezas de esta, así como las prácticas profesionales que podríamos llevar a cabo en ella, ya sea para potenciarlo o para contribuir en su mejoramiento con soluciones efectivas.

En tal sentido, la necesidad de hacer eficientes y económicamente viables las grandes inversiones requeridas para la construcción, operación y mantenimiento de estas infraestructuras requiere mejorar el desempeño de los abastecimientos, lo que implica a los responsables el deber de convertirse en gestores de un servicio transparente, sostenible y eficaz. En este contexto, la gestión de activos puede convertirse en una solución práctica a dicha problemática. Este modelo de gestión incluye todas las actividades necesarias para que una organización maneje de manera óptima sus activos físicos, las funciones de estos y el gasto asociado a sus ciclos de vida. Para ello, resulta fundamental poseer información de diversos aspectos del sistema con el propósito de servir de soporte a la toma de decisiones.

CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIAL

2.1. MARCO REFERENCIAL

Como primera tesis se tiene la realizada por (Villegas, 2006), esta lleva como título “Propuesta para el control del mantenimiento preventivo y correctivo, mediante el uso de un paquete de computación, en la planta geotérmica Orzunil 1”, busca generar una propuesta para que la planta geotérmica Orzunil 1, pueda tener una gestión de mantenimiento de clase mundial. Este trabajo, consta de cinco capítulos, en el primer capítulo se aborda el mantenimiento, las generalidades de este, es decir, desde el concepto, sus objetivos y los costos de este. En el segundo capítulo, se abarca la planta Geotérmica Orzunil 1, definen la geotermia, la generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica, entre otros aspectos propios de esta. El tercer capítulo, explica la administración del mantenimiento, el proceso administrativo, es decir, la planeación, la organización, la dirección y el control. El cuarto capítulo, es la codificación del equipo y control actual del mantenimiento. El quinto y último capítulo son los diferentes programas de computación que podrían ayudar con el control del mantenimiento. Como conclusión, se presentan tres programas de computación, y se propone un programa específico acorde a las necesidades de la empresa en mención.

Otra tesis, es la realizada por (Sierra, 2004), la cual lleva de título “Programa de mantenimiento preventivo para la empresa metalmecánica industrias AVM S.A”, este programa asegura la continuidad del proceso productivo de dicha empresa y alcanzar metas trazadas. Tiene seis capítulos; el primer capítulo aborda la descripción del problema, generalidades de la empresa, entre otros aspectos. El segundo capítulo, es la fundamentación teórica del trabajo, es decir, se abarcan diferentes conceptos propios del tema. El tercer capítulo, es el diagnóstico de la función de mantenimiento en industrias AVM S.A. El cuarto capítulo, es un modelo para la administración del mantenimiento en la industria AVM S.A. En el quinto capítulo, se refiere a la implementación del programa de mantenimiento preventivo y el sexto capítulo, son los indicadores de mantenimiento a alcanzar. Como conclusión, se diseñó un modelo de mantenimiento preventivo acorde a las necesidades de la empresa, haciendo después una respectiva inspección del mismo y no se presentaron no conformidades.

(Meléndez, 2010) presentó la monografía titulada “Modelo general de mantenimiento del sistema de control distribuido (dcs) marca honeywell en la grb

Ecopetrol”, la cual a través de la aplicación de conceptos relevantes sobre la medición real de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de una forma clara que permita su aplicación en la GRB Ecopetrol. Dicha monografía consta de cinco capítulos, en el primer capítulo se observa la descripción de equipos y los controles industriales de estos, además de las generalidades de la empresa; el segundo capítulo es el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), su concepto y características; una manera de conocer los equipos a los cuales se les aplicará esta metodología es necesario el análisis de los equipos críticos, siendo esto lo que abarca el tercer capítulo; En el cuarto capítulo se explican las fórmulas correspondientes a disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad; El quinto capítulo es el modelo de gerencia de mantenimiento basado en RCM, el estudio del mismo, las tareas a ejecutar, métodos y herramientas a utilizar, entre otros aspectos. Como conclusión, se implementaron modelos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, los cuales deben ser revisados en un tiempo determinado llevando así un registro de estos.

(Pesántez, 2007) He presented the thesis for obtaining an Industrial Engineer degree, entitled "Preparation of a predictive and preventive maintenance plan based on the criticality of the equipment of the production process of a shrimp packing company", which is focused on providing a reliable guide of the types and frequency of maintenance for the equipment. It consists of five chapters, the methodology, background, objectives and others of the project are in the first chapter; In the second chapter the theoretical framework is proposed; Chapter three is the situational analysis of the company; The fourth chapter is the design of the maintenance plan, critical equipment is determined, the productive process of each one, frequency calculation and failures, among others; and in the fifth chapter conclusions and recommendations are presented. In conclusion, an annual maintenance plan was prepared for critical equipment that affects either directly or indirectly the production process.

The thesis carried out by (Valdivieso, 2010) entitled "Design of a preventive maintenance plan for the company extruplas SA", this seeks to design maintenance schedules according to the needs of the company, thus avoiding machine failures and production delays. It consists of four chapters, in the first chapter is the analysis of the company, its general aspects, its location, its process, among other aspects; the types of maintenance, the execution of each one are in the second chapter; The third chapter is the company's maintenance plan; In the fourth chapter the maintenance costs (the applied rates) are observed. Finally, after having determined through an analysis that the type of maintenance being performed was not adequate, the appropriate type is preventive.

2.2. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de esta investigación va encaminado en la implementación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad como pilar del mejoramiento continuo y los nuevos niveles de fiabilidad en las empresas. Debido esto, en este trabajo apuntaremos al análisis de los instrumentos de medición y control que se encuentran en cada una de las estaciones que intervienen en los procesos productivos de la Empresa y la criticidad de cada una de ellas, para definir y diseñar de la manera más precisa el plan de mantenimiento.

El mantenimiento se puede definir como el control constante de las instalaciones y equipos para asegurar que estos activos físicos sigan desempeñando sus funciones de manera deseada, respetando todos los requerimientos de seguridad, calidad y ambientales como garantes de la sostenibilidad en los recursos externamente relacionados. De igual manera dejaremos claro las definiciones de confiabilidad y mantenimiento, estos dos conceptos serán la columna vertebral del estudio a desarrollar.

La confiabilidad es la confianza que se le tiene a los equipos o sistemas para que realicen sus funciones de manera preestablecidas, sin sufrir ningún tipo de fallas en un periodo de tiempo definido, en condiciones operativamente específicas.

A todas estas, se tiene, debido a los conceptos anteriormente, la idea clara de la importancia de la implementación de un plan de mantenimiento que lleve a un funcionamiento óptimo y una trazabilidad veraz que cumpla de manera satisfactoria el funcionamiento del sistema de instrumentación y control junto con la operatividad de las estaciones de la empresa.

El agua, visualizándola como un servicio de primera necesidad, según expresa Expósito y Berbel (2006), es un derecho fundamental de los seres humanos, por lo que desde la época de los romanos se ha considerado un bien público. Este hecho obliga a las administraciones públicas a gestionar eficientemente dicho recurso con el objeto de garantizar el suministro en cantidad y en calidad.

En cuanto al ciclo integral del agua urbana, se puede dividir en tres fases bien diferenciadas: abastecimiento, saneamiento y reutilización. El abastecimiento engloba el conjunto de procesos desde la captación del agua (tanto superficial como subterránea) hasta la llegada del recurso al punto de consumo de los usuarios.

Dentro del abastecimiento urbano, podemos diferenciar las categorías abastecimiento en alta, también llamado aducción. Esto engloba la captación del

recurso hídrico, que incluye la captación de aguas superficiales, la extracción de recursos subterráneos, así como las fuentes no convencionales (desalinización); el transporte por conducciones principales; y el almacenamiento en depósitos reguladores.

Está también, según expresa Expósito y Berbel (2006), el abastecimiento en baja, que comprende el almacenamiento intermedio, la distribución y el suministro hasta los puntos de consumo de los usuarios de la red.

El saneamiento es la fase del ciclo del agua urbana que se encarga de recoger y transportar el agua residual, entiéndase como agua residual aquella que ya ha sido utilizada (aguas pluviales, aguas de uso doméstico, industrial, etc.). Esta etapa también incluye el tratamiento, tanto del agua, como de los subproductos derivados del propio proceso de saneamiento, con el objetivo de reducir al mínimo posible el impacto al medio generado por los vertidos. Además de ser un proceso fundamental para la sostenibilidad ambiental, esta etapa es imprescindible en zonas áridas o semiáridas por la escasez de recursos hídricos. La gestión del agua, a lo largo de todas las fases del ciclo urbano, puede estar a cargo de empresas públicas, privadas o mixtas, aunque el regulador sea siempre la Administración Pública.

En cuanto a la Empresa Aguas de Cartagena S.A. E.S.P., esta es una organización de servicios públicos encargada del manejo del acueducto y alcantarillado en la ciudad de Cartagena. Fue fundada en el año de 1995, bajo carácter mixto (50% Distrito, 45% Aguas de Barcelona – AGBAR-, y 5% accionistas privados) y lleva 12 años de gestión.

La Empresa Aguas de Cartagena S.A. E.S.P., ha incorporado tecnologías para su mantenimiento y operación, con el fin de mejorar continuamente el sistema de acueducto y alcantarillado. Esta organización tiene una cobertura de agua potable superior al 99% y de alcantarillado, superior al 82.4%.

Es oportuno señalar, que Aguas de Cartagena S.A. E.S.P., tiene una continuidad de su servicio del 100%, tiene más de 180.000 usuarios, y alta calidad de agua tratada y distribuida de acuerdo con los estándares internacionales. Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. cuenta con los siguientes grupos de instalaciones físicas: Estaciones de bombeo de agua cruda (EBAC) que están encargadas de la captación del agua de las fuentes naturales del Canal del Dique, y bombearlas a la Planta de Tratamiento; la planta de tratamiento de agua potable, ubicada en el barrio Paraguay que efectúa los procesos para el correcto tratamiento del agua cruda y, así, convertirla en agua potable para el consumo humano; Estaciones de bombeo de agua potable (EBAP) que están encargadas de la distribución del agua

potable a los diferentes sectores de Cartagena y las Estaciones de bombeo de aguas residuales (EBAR), encargadas del bombeo de las aguas residuales para su disposición final.

Mantenimiento

El mantenimiento es un servicio que agrupa una serie de actividades cuya ejecución permite alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos, máquinas, construcciones civiles e instalaciones. Además, permite eliminar condiciones inseguras que podrían afectar a las personas.

Anzola (1992), lo describe como "Aquél que permite alcanzar una reducción de los costos totales y mejorar la efectividad de los equipos y sistemas".

El Centro Internacional de Educación y Desarrollo (1995), define al mantenimiento como: "El conjunto de acciones orientadas a conservar o restablecer un sistema o equipo a su estado normal de operación, para cumplir un servicio determinado en condiciones económicamente favorables y de acuerdo con las normas de protección integral".

Para Moubray (1997), el mantenimiento significa "Acciones dirigidas a asegurar que todo elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas".

A partir de los criterios formulados por los autores citados en relación con el concepto de mantenimiento, se puede definir como "el conjunto de actividades que se realiza a un sistema, equipo o componente para asegurar que continúe desempeñando las funciones deseadas dentro de un contexto operacional determinado."¹

Los objetivos del mantenimiento son los siguientes:

- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes
- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, las fallas de los equipos de la empresa.
- Disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar.
- Evitar parada de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.

¹ *Mantenimiento: Generalidades*. Universidad de Piura. Biblioteca Web. Recuperado de: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_44_176_10_294.pdf

- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Disminuir los costos de mantenimiento.

El mantenimiento adecuado tiende a prolongar la vida útil de los bienes, a obtener un rendimiento aceptable de los mismos durante más tiempo y a reducir el número de fallas.

Mantenimiento Correctivo

Como sabemos el mantenimiento correctivo es el que se realiza cuando ya se produce el daño en el equipo o el daño en este ya es inminente. Este tipo de mantenimiento se realiza en la gran mayoría de empresas.

En el caso de que no se produzca ninguna falla, el mantenimiento es nulo, por lo que se tendrá que esperar hasta que se produzca un fallo para en ese momento tomar acciones al respecto, esto trae repercusiones a la empresa como:

- Paradas no previstas
- Costos de mantenimiento no presupuestados

Dentro del mantenimiento correctivo tenemos dos tipos de mantenimiento correctivo que son:

- **Mantenimiento rutinario:** es la corrección de fallas que no afectan mucho a los sistemas.
- **Mantenimiento de emergencia:** se origina por las fallas de equipo, instalaciones, edificios, etc., que requieren ser corregidos en plazo breve.

Mantenimiento Preventivo

EL mantenimiento preventivo, como su nombre lo dice, son las labores que se realizan antes de que ocurra un desperfecto en la maquinaria, todo esto ocurre bajo condiciones controladas en la empresa.

Ventajas de mantenimiento preventivo:

- Seguridad: Las obras e instalaciones sujetas a mantenimiento preventivo operan en mejores condiciones de seguridad.
- Vida útil: Una instalación tiene una vida útil mucho mayor que la que tendría con un sistema de mantenimiento correctivo.
- Coste de reparaciones: Es posible reducir el costo de reparaciones si se utiliza el mantenimiento preventivo.

- Inventarios: También es posible reducir el costo de los inventarios empleando el sistema de mantenimiento preventivo.
- Carga de trabajo: La carga de trabajo para el personal de mantenimiento preventivo es más uniforme que en un sistema de mantenimiento correctivo.
- Aplicabilidad: Mientras más complejas sean las instalaciones y más confiabilidad se requiera, mayor será la necesidad del mantenimiento preventivo.²

Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto está basado en la “ley 80-20” o de “los pocos vitales y muchos triviales”, enunciada por el economista italiano Vilfredo Pareto a principios de siglo. Pareto se dio cuenta de que la mayor parte de la riqueza de Italia se concentraba en manos de una pequeña parte de la población, quedando el resto distribuido entre la mayoría. Aplicando este mismo principio, cuando dividimos las causas que explican un problema en la organización, si somos capaces de cuantificar su efecto (p.ej. en coste), nos daremos cuenta generalmente de que sólo con unos pocos factores se explica la mayor parte del efecto. Esto nos permite focalizar los esfuerzos en esas causas principales.

En esto consiste la “Ley 80-20”: en un 20% de los factores o causas se concentra el 80% del efecto. Por supuesto, son números redondos, simbólicos. También es conocido este principio como “clasificación ABC”: los factores o causas “A” se corresponderían con el 20% que soporta el 80% del peso total del problema.³

Objetivos del Análisis de Pareto.

El análisis de Pareto es una herramienta de mantenimiento muy utilizada para la identificación de problemas crónicos y tiene como objetivo:

- Identificar oportunidades para llevar a cabo mejoras.
- Identificar los sistemas, equipos o elementos que están causando la materia de problemas a mantenimiento y producción.
- Buscar las causas principales de los problemas y establecer la prioridad de las soluciones.

² Valdivieso, J. (2010). Diseño de un plan de Mantenimiento Preventivo para la empresa EXTRUPLAS S.A. (Tesis de Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca. Obtenido en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/831/12/UPS-CT001680.pdf>

³Lagoas, M. *Diagrama de Pareto*. Universidad de Vigo. España. Obtenido de: <http://gjo.uvigo.es/asignaturas/gestioncalidad/GCal0405.DiagramaPareto.pdf>

- Evaluar los cambios de los resultados efectuados a un proceso.⁴

Árbol Lógico de Fallas

El árbol lógico de fallas es considerado una herramienta de la confiabilidad operacional que “permite representar gráficamente las relaciones de causa y efecto que nos conduce a descubrir el evento indeseable y cuál fue la causa raíz del problema”⁵. En la práctica el RCA es quien coloca los datos de una falla en forma lógica y comprensible, mostrando en un diagrama la toma de decisiones verificadas a través de preguntas para obtener la respuesta correcta.

De acuerdo con lo anterior, la construcción del árbol lógico de fallas en un proceso de RCA consta de los siguientes pasos que son descritos a continuación:

- ✚ Evento: En este paso se realiza la descripción de la falla repetitiva que se encuentra ocasionando problemas y pérdida en la función de una pieza o proceso, el análisis de estos problemas debe basarse en hechos verificados que permitan iniciar el proceso de análisis de la falla.
- ✚ Modos de falla: Son una descripción más detallada de cómo ocurrió el evento en el pasado, estos deberán estar basados en hechos. En este paso el análisis del evento son las diferentes fallas que originaron el problema principal y su función es dividir el problema central en cuadros más pequeños para hacerlo más manejable.
- ✚ Causa Física: Este nivel reúne todas las causas de origen físico que pudieron dar origen a la falla, es la causa tangible.
- ✚ Causa Humana: Errores cometidos por el factor humano que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia de la falla.
- ✚ Causa Latente: Son todos aquellos problemas que, aunque no hayan ocurrido son factibles de que ocurran. También pueden ser considerados como los sistemas de organización que las personas utilizan para tomar decisiones, cuando estas son deficientes se traducen en errores de decisión que pueden ocasionar dificultades en el funcionamiento adecuado de los

⁴ Moncada, D. (2009). Seminario en Metodología de Análisis de Fallas. (Tesis Pregrado). Universidad de Santander. Bucaramanga.

⁵ Latino. Robert J. Calidad del Proceso y Análisis de Causa Raíz. (Parte 1) Obtenido de: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnnew/bib/notas/11calidad.asp>

equipos, algunos ejemplos de estas causas pueden ser: falta de procedimientos, capacitaciones inadecuadas, problemas de comunicación.

Modelo de Criticidad por Factores ponderados

“El análisis de criticidad permite identificar y jerarquizar por su importancia los elementos de una instalación sobre los que vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos). Para el del análisis de las estaciones de tratamiento de Acuacar se propone seguir la metodología desarrollada por la Consultoría Inglesa “The Woodhose Partnership Limited”, llamada el modelo de criticidad “Factores ponderados basados en el riesgo”. Este modelo está basado en el concepto del riesgo así:

- Criticidad Total = Frecuencia x Consecuencia.
- Frecuencia = Rango de fallas en un tiempo determinado (Fallas/año)
- Consecuencias = (Impacto operacional x Flexibilidad) + Costo de Mtto + Impacto seguridad y ambiente”⁶.

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo se presentan a continuación:

Ilustración 1 - Factores ponderados

Frecuencia de Fallas	Niveles
Mayor a 2 fallas por año	4
Una a dos fallas por año	2
Menor a una falla por año	1
Impacto operacional	Niveles
Parada de planta	10
Parada del sistema de monitoreo	7
Perdida de inventario parcial	4
No hay impacto en operación	1
Flexibilidad operacional	Niveles
No hay función de repuesto	4
Repuesto disponible en fábrica	2
Repuesto disponible en Ecopetrol	1
Costos de mantenimiento anual	Niveles
Mayor a 10% del valor del equipo	2
Menor a 10% del valor del equipo	1
Medio ambiente y seguridad	Niveles
Afecta la seguridad humana	10
Afecta las instalaciones	7
Provoca daños menores	4
No provoca daños ambientales	1

Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de*

⁶ Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

una Empresa Empacadora de Camarón. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

- **FRECUENCIA DE FALLAS**

Primero definimos la frecuencia de falla de las estaciones a analizar, cuantificando las frecuencias de fallas con un valor, para así de esta manera determinar cuáles son las estaciones más críticas. A continuación, un ejemplo de aplicación.

Tabla 1 - Ejemplo de Frecuencias de Fallas

PROCESO	FRECUENCIA	CUANTIFICACIÓN
Generación de Vapor	1 – 2 Fallas/mes	2
Teñido y Tinturado	2 – 4 Fallas/mes	3
Bombeo de Agua	5 – 7 Fallas/mes	4

Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

Ahora se plantea la forma en cómo se analizará las consecuencias de las fallas para así poder determinar el segundo factor de la fórmula de criticidad total, el cual se calcula con la siguiente fórmula:

Consecuencias = (Impacto operacional x Flexibilidad) + Costo de Mtto + Impacto seguridad y ambiente.

- **IMPACTO OPERACIONAL**

El impacto operacional es aquel que determina el comportamiento de la producción en presencia de una eminente falla. A continuación, un ejemplo de aplicación.

Tabla 2 - Ejemplo de Impacto Operacional

PROCESO	CONSECUENCIA	CUANTIFICACIÓN
Generación de Vapor	Parada Inmediata de todo el complejo	10
Teñido y Tinturado	Impacto a niveles de Productividad	6
Bombeo de Agua	No genera ningún efecto o impacto significativo sobre las demás operaciones	1

Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

- **FLEXIBILIDAD OPERACIONAL**

La flexibilidad operacional se refiere a las posibilidades de poder recuperar la pérdida con componentes en stand-by.

Tabla 3 - Ejemplo de Flexibilidad Operacional

PROCESO	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	CUANTIFICACIÓN
Generación de Vapor	Hay opción de producción a la capacidad mínima permisible.	4
Teñido y Tinturado	Función de repuesto disponible	1
Bombeo de Agua	Hay opción de repuesto compartido	3

Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

- **COSTOS DE MANTENIMIENTO**

Los costos de mantenimiento se refieren a los costos que genera reparar esa determinada falla, en este punto el equipo natural de trabajo deberá tener en cuenta el personal y los repuestos requeridos.

Tabla 4 - Ejemplo de Costos de Mantenimiento

PROCESO	COSTOS DE OPERACIÓN	CUANTIFICACIÓN
Generación de Vapor	Mayor a \$ 10.000	2
Teñido y Tinturado	Mayor a \$ 10.000	2
Bombeo de Agua	Menor a \$ 10.000	1

Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

- **IMPACTO EN LA SEGURIDAD AMBIENTAL Y HUMANA**

La seguridad ambiental y human se refiere a si esa determinada falla causa inseguridad tanto en el medio ambiente como en los operarios. EJ: Un derrame de

crudo, fugas de goteo de lubricantes de los equipos en el proceso productivo, escapes de gases contaminante, etc.

Tabla 5 - Ejemplo de Impacto S.A.H

PROCESO	IMPACTO S.A.H.	CUANTIFICACIÓN
Generación de Vapor	No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o el medio ambiente.	1
Teñido y Tinturado	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Bombeo de Agua	No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o el medio ambiente.	1

Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

Definición de Matriz de Criticidad de Equipos. Variables que intervienen

La Matriz de Criticidad es una herramienta que permite establecer niveles jerárquicos de criticidad en sistemas, equipos y componentes. En función del impacto global que generan, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones y priorización de los mantenimientos programados, sean preventivos o predictivos.

Los pasos para elaborar la matriz de criticidad son los siguientes:

1. Describir el proceso productivo, pero indicando en cada parte del proceso, el tipo de operación que realizan, es decir, si son de operación manual (Sólo persona), semiautomático (Persona y equipos) o sólo automáticos (Máquinas especializadas).
2. Definir el tipo de estructura del sistema (En serie, paralelo activo o pasivo, o combinado).
3. Efectuar el cálculo de frecuencias y consecuencias de fallos en los equipos principales para cada parte del proceso.
4. Determinar la matriz de Criticidad con cada uno de los procesos sujeto al análisis previo.

Ilustración 2 -Modelo de Matriz de Criticidad



Fuente: Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

2.3. MARCO LEGAL

En Aguas de Cartagena S.A. E.S.P existe un Comité de Gestión de Calidad y Medio Ambiente, basado en las normas NTC-ISO 9000 e ISO 14000 respectivamente, que planifica y desarrolla un programa donde se fijan objetivos y metas, así como los medios y recursos necesarios para alcanzarlos y que se fundamenta en la realización de acciones de mejoramiento que benefician a los clientes, a las entidades con las que participan, la sociedad y el entorno ó medio ambiente. A continuación, se presentan las diferentes normas en las que se soporta el sistema de Gestión de calidad y Medio Ambiente de AGUAS DE CARTAGENA S.A. E.S.P...

El sistema de Gestión de Calidad y Ambiente se soporta en la siguiente normativa:

NORMAS GENERALES

- Norma NTC-ISO 9000 (Dic. 2000) “Sistemas de Gestión de la Calidad. Fundamentos y Vocabulario”.
- Norma NTC-ISO 9001 (Dic. 2000) “Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos”.
- Norma NTC-ISO 9004 (Dic. 2000) “Sistemas de Gestión de la Calidad. Directrices para la mejora del desempeño”.
- Norma NTC-ISO 14001 “Sistema de Gestión Ambiental. Requisitos con orientación para sus usos” (2004).
- Norma NTC-ISO 14004 “Sistema de Gestión Ambiental. Directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de apoyo” (2004).
- Norma NTC-ISO 19011 “Directrices para la auditoria de los sistemas de gestión de la calidad y/o ambiental” (Noviembre de 2002).
- Norma NTCGP 1000:2004 Norma Técnica de Calidad en la Gestión pública.

NORMAS ESPECIFICAS DE ÁMBITO NACIONAL

En cuanto al producto y la prestación del servicio:

- Ley 142 de 1994 “Régimen de servicios públicos domiciliarios”
- Decreto 475 de 1998 “Normas técnicas de calidad de agua potable”
- Decreto 1594 de 1984 “Usos del agua y residuos líquidos”
- Decreto 1842 de 1991 “Estatuto nacional de usuarios de servicios públicos domiciliarios”.
- Decreto 302 de 2000 “Reglamentario de la prestación de los servicios”.
- Resolución 1096 de 2000 “Reglamento Técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico” RAS

- Resoluciones de la CRA 151, 153, 155 y 156 de 2001 y 315 de 2005 mediante la cual se establecen los criterios de clasificación de riesgos para empresas prestadoras de servicios públicos.

En lo referente a la gestión ambiental de los procesos:

- Ley 99 de 1993 “Creación del Ministerio del Medio Ambiente y del SINA”
- Decreto ley 2811 de 1974 “Código Nacional de los recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente”
- Ley 9 de 1979 “Código Sanitario Nacional”
- Código penal: Ley 599 de 2000.

NORMAS INTERNAS

- Manual de seguridad e Higiene de Aguas de Cartagena.
- Manual de Descripción de Cargos y Competencias.
- Manual de Control de Impacto Urbano.⁷

⁷ Argumedo, A. & Marrugo, A. (2008). *Estado del arte de la automatización en la empresa Aguas de Cartagena S.A. E.S.P.* Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica Bolívar. Obtenido en: <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0043890.pdf>

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el problema referido al bajo rendimiento de las estaciones, sin priorización de las estaciones críticas, el plan de mantenimiento no definido entre otros; el tipo de investigación que se realizó para tener idea general acerca del funcionamiento de las estaciones con sus respectivos equipos es descriptiva y analítica dado que se estudiaron datos y cifras relacionadas con los componentes estratégicos tenidos en cuenta para la criticidad de los equipos y el comportamiento de cada estación de acuerdo con el tiempo de funcionamiento.

3.2. HIPÓTESIS

Se implementará un plan de mantenimiento, desde una acción preventiva, caracterizado por desarrollar un criterio en conjunto de operaciones encaminadas a prolongar la vida útil de los aparatos y/o instalaciones con el objetivo de evitar la interrupción de las actividades laborales por acontecimientos imprevistos. También suelen aplicarse técnicas de mantenimiento preventivo con la finalidad de mejorar la eficiencia y productividad, ya sea a nivel de producto u organizativo, mejorando el sistema.

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

De acuerdo con los elementos intervinientes en el estudio, se alcanza a identificar dos variables independientes: Mantenimiento y Prevención; ambas vinculadas a las variables dependientes Sistema Operativo de la Empresa, Presupuesto, Depreciación de la maquinaria, y Orden económico local. Como variables intervinientes: violencia política, sistema económico nacional, costo de los equipos y refracciones de las maquinarias.

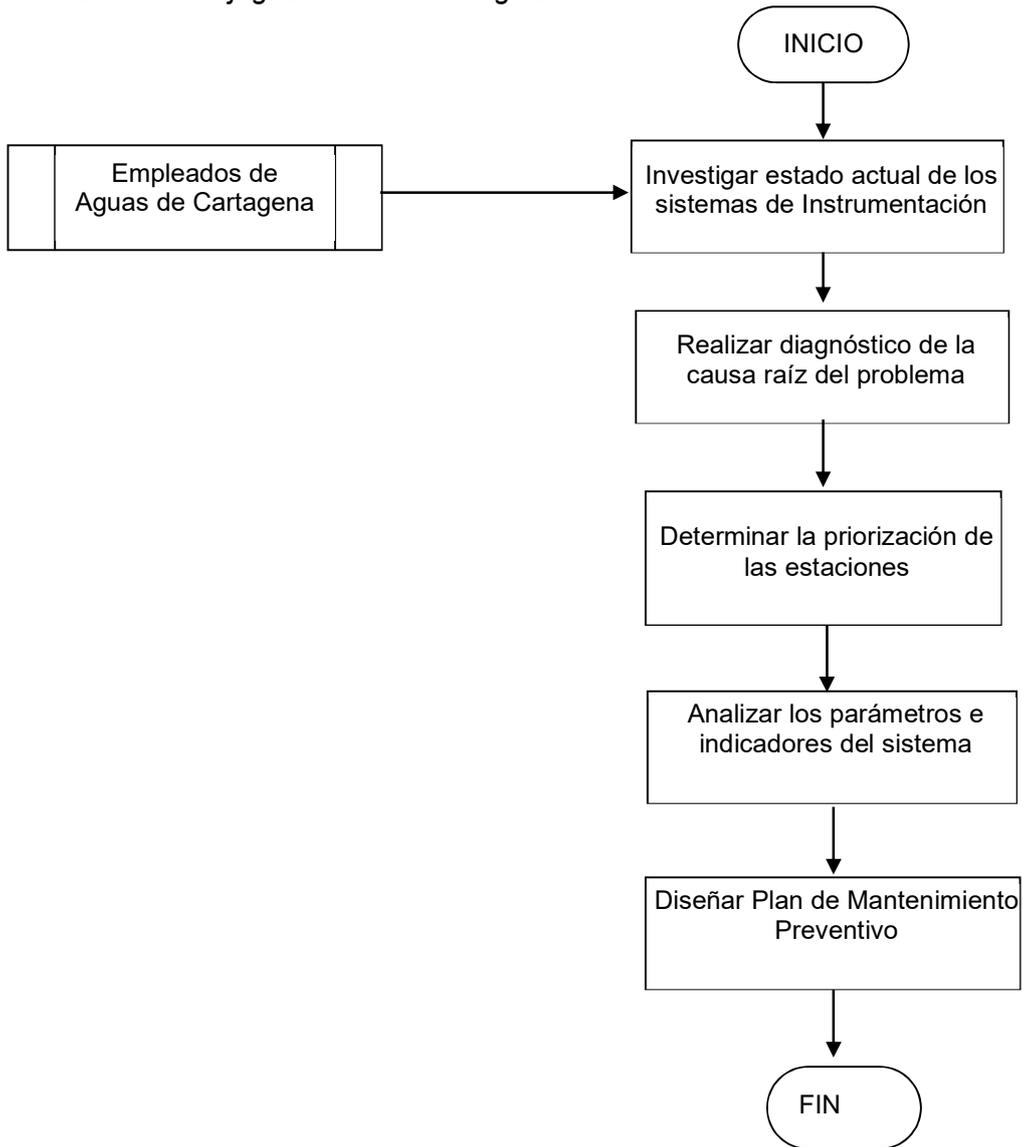
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

Esta investigación se realizará en la empresa Aguas de Cartagena E.S.P, partiendo de este hecho no se tendrá en cuenta muestra ni tipo de muestreo, haciendo énfasis en el Departamento de Telemando.

3.5. PROCESO METODOLÓGICO

El siguiente flujograma se encuentra indicado los pasos del desarrollo de la investigación para llevar a cabo el trabajo de grado.

Ilustración 3 - Flujograma de la Investigación



Elaboración Propia.

3.6. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información primaria de la investigación se obtendrá a través de diferentes técnicas e instrumentos que permitan obtener información útil y de calidad como son las entrevistas a los distintos trabajadores de Aguas de Cartagena.

La información secundaria de la investigación se obtendrá por medios de artículos de revistas de investigación sobre el sector de distribución de agua, publicaciones, tesis con base a los Mantenimientos preventivos y la página web de la empresa, revistas especializadas en mantenimiento y negocios e investigaciones previas. Además, se tendrá en cuenta información complementaria por medio de las estadísticas e indicadores de mantenimiento de Aguas de Cartagena.

3.7. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación va inducida hacia la línea de investigación de Productividad, Competitividad e Innovación, la cual tiene como objetivo apoyar el desarrollo productivo, tecnológico y empresarial de la región y el país, a través de proyectos de investigación que permitan la innovación de procesos, procedimientos y técnicas tendientes al aprovechamiento integral de los recursos de la organización. Dentro de dicha línea se encuentran el área temática de “Gestión de las Operaciones y Logística” con el tema hace énfasis a Mantenimiento, en el cual esta direccionado este trabajo de grado.

CAPÍTULO 4: REVISIÓN DE RESULTADOS FRENTE A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.1. DESARROLLO DEL OBJETIVO ESPECIFICO N°1

Diagnosticar el mantenimiento correctivo en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento mediante un análisis de causa raíz estableciendo así las principales causas de las fallas presentadas.

Se desarrolló el diagnóstico basado en un análisis de causa raíz, se realizó una visita a la empresa y en la cual se hizo el levantamiento de información mediante entrevistas a todo el personal del Dpto. de Telemando, brindado toda la información de cómo funciona su área, cuáles procesos maneja y qué servicios prestan cada estación. Telemando cuentan con 3 Auxiliares, 3 Supervisores, 2 Ingenieros y un Coordinador, además nos suministraron información sobre los indicadores de las fallas por mes, tiempo promedio entre fallas y tiempo promedio de solución que se describen en el numeral 4.1.1. y con esta información suministrada se plantearon las principales causas de fallas.

4.1.1. Análisis del funcionamiento de las Estaciones

Actualmente Acuacar cuenta con 78 estaciones de tratamiento divididas de la siguiente manera:

- ✚ **Estaciones de bombeo de agua cruda (EBAC):** Son las encargadas del bombeo de agua cruda hacia la planta de tratamiento de Paraguay para su tratamiento de potabilización. Son 5 estaciones y requieren de un operador para su funcionamiento y se encuentran por fuera de la ciudad, dentro de los equipos más significativo que se encuentran en ella son: PLC, sensores de presión, caudal, medidores de parámetros de calidad (conductividad, PH, turbiedad), medidor de energía, entre otro.
- ✚ **Estaciones de bombeo de agua potable (EBAP):** Son las encargadas del bombeo de agua potable para la distribución a los usuarios. Acuacar cuenta con 7 estaciones y dentro de los equipos más significativo que se encuentran en ella son: PLC, sensores de presión, caudal, medidores de parámetros de calidad(cloro), medidor de energía, variadores de velocidad.

- ✚ **Estaciones de bombeo de agua residual (EBAR):** Son las encargadas del bombeo de agua residual hacia el emisario submarino. Son 20 estaciones dedicadas a esta operación, dentro de los equipos más significativo que se encuentran en ella son: PLC, sensores de presión, caudal, medidores de parámetros de calidad(cloro), medidor de energía, variadores de velocidad.

- ✚ **Estaciones de medida agua cruda (EMAC):** Son las estaciones que se encargan de las mediciones de caudales y presión del sistema de agua cruda. Son 12 estaciones en totales y dentro de los equipos se encuentran: PLC, sensores de presión, caudal.

- ✚ **Estaciones de medida agua potable (EMAP):** Son las estaciones que se encargan de las mediciones de caudales y presión del sistema de agua potable. Dentro de los PLC, sensores de presión, caudal, medidores de parámetros de calidad(cloro). Actualmente Acucar cuenta con 31 estaciones de este tipo.

- ✚ **Estación Eléctrica (EE):** Son centros de monitoreo de red eléctrica de alta tensión para las EBAC. Solo se tiene una estación y el tipo de equipos que tiene son PLC.

- ✚ **Estación de monitoreo central (CMC):** Centro remoto de recolección de información de todas las estaciones remotas, hay dos centros y cuentan con PLC crítico.⁸

Conociendo como es el funcionamiento de las estaciones y el tipo de tratamiento que se tienen en cada una de ellas, el % de ejecución del mantenimiento de las estaciones actualmente es del 49%, presentando histórico del índice 32 fallas por mes/promedio de las estaciones, a continuación, se relaciona el número de fallas presentada en los meses puntuales.

	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20
Falla x mes	38	37	31	24	29	33

⁸ Fuente: Repositorio del Dpto. de Telemando

Fuente: Repositorio del Dpto. de Telemando

Para el indicador de tiempo medio entre fallas se tiene un promedio de 26 horas en estos últimos meses.

	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20
Tiempo medio entre fallas (hr)	20	26	25	21	36	30

Fuente: Repositorio del Dpto. de Telemando

El tiempo promedio de solución que actualmente tiene la empresa para las estaciones de tratamiento en promedio es de 5 horas para darle solución.

	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20
Tiempo promedio de solución (hr)	8	5	5	6	5	4

Fuente: Repositorio del Dpto. de Telemando

Con estos indicadores se evidencia que la empresa tiene un índice significativo de fallas en los equipos de las estaciones lo cual ocasiona recurrir a las horas extras, que equivalen a un 70% de la suma total del tiempo de solución, es decir, a los mantenimientos correctivos. Con esta situación la empresa proyecta incluir dos personas más para atender todos los mantenimientos que requiere las estaciones.

La información que brinda el Equipo de Telemando es que una hora extra es pagada por la empresa de acuerdo con el cargo que se tenga, para ello una hora extra de un auxiliar es de \$11.000 pesos M/TEC, supervisor \$16.000 pesos M/TEC y un ingeniero \$ 20.000 pesos M/TEC siendo extras diurnas; el costo del contrato que se realizaría a cada auxiliar sería de \$ 1.992.000 pesos M/TEC durante 6 meses, así mismo se incurren con unos altos costos de combustible por el desplazamiento a las estaciones y como se mencionó anteriormente hay 5 que están por fuera de la periferia de la ciudad lo cual hace más desgastante la ejecución del trabajo.

Basándonos con los datos suministrado por la empresa se logra concluir que actualmente incurren con costos de horas extras de aproximadamente de **\$ 8.799.300** en estos últimos 6 meses, como se indica en la tabla 6. Así mismo los costos asociados a combustibles ascienden a **\$ 3.456.000**, ya que la empresa tiene un seguimiento de los km recorridos por falla de la siguiente forma:

Por recorrido de Paraguay a las estaciones en promedio es de 50 km y un galón tiene un promedio de 30km ACPM con un costo de aproximadamente de **\$ 9.000** pesos, en lo que ellos estipulan que son 2 galones por falla, lo que corresponde a **\$ 18.000** pesos por falla en cuanto a combustible.

Tabla 6 - Costos de Horas extras

	sep-19	oct-19	nov-19	dic-19	ene-20	feb-20	Total
Falla x mes	38	37	31	24	29	33	192
Tiempo promedio de solución (hr)	8	5	5	6	5	4	33
Horas totales	304	185	155	144	145	132	1065
Horas Extras	212,8	111	93	86,4	87	79,2	669,4
Horas por Supervisor	106,4	55,5	46,5	43,2	43,5	39,6	334,7
Horas Por Auxiliar	106,4	55,5	46,5	21,6	43,5	39,6	313,1
Costos total Horas Extras	\$ 2.872.800	\$ 1.498.500	\$ 1.255.500	\$ 928.800	\$ 1.174.500	\$ 1.069.200	\$ 8.799.300

Elaboración Propia.

Igualmente, el Dpto. de Telemando asume un gasto en repuestos mensuales de 18 millones de pesos en repuestos por las fallas a su presupuesto, repartidos de la siguiente forma:

- 8 millones en Sistemas de Cloración entre bombas dosificadoras y transmisores.
- 6 millones en Comunicación entre Radios y Antenas de comunicación.
- 8 millones en sistema de bombeo ente los sistemas de control de los bombeos, módulos de los PLC, sensores de presión, Nivel y Caudal; fuentes de alimentación.

En la tabla 1 presenta, los tipos de fallas, cuantas veces se presentan en las estaciones y cuantos equipos se han visto afectados por ese tipo de falla, además el tiempo de falla y el TMC (Tiempo de mantenimiento correctivo), para así realizar el árbol de causa raíz.

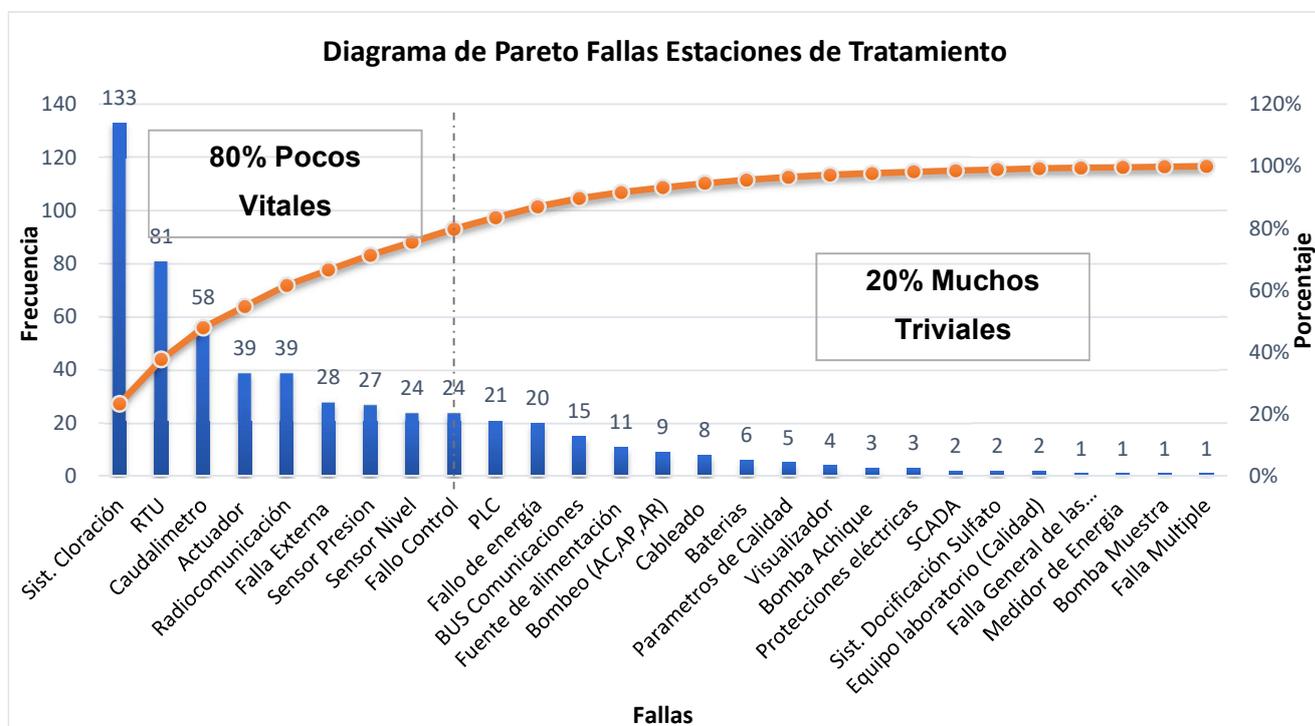
Tabla 7 – Análisis de Fallas

FALLAS	Nº DE ESTACION	TIPO DE EQUIPO	TIEMPO FALLA [HRS]	TIEMPO INTERVENCIÓN
Sist. Cloración	133	29	14,35	5,87
RTU	81	33	13,53	4,00
Caudalímetro	58	25	83,88	3,76
Actuador	39	4	8,54	2,90
Radiocomunicación	39	19	6,80	1,99
Falla Externa	28	6	9,66	2,77
Sensor Presión	27	13	3,04	1,82
Sensor Nivel	24	10	5,81	1,47
Fallo Control	24	5	9,87	1,86
PLC	21	6	2,84	1,71
Fallo de energía	20	2	4,93	1,04
BUS Comunicaciones	15	2	2,79	1,57
Fuente de alimentación	11	11	3,27	0,91
Bombeo (AC, AP, AR)	9		2,32	0,60
Cableado	8	2	1,83	0,59
Baterías	6	4	0,53	0,43
Parámetros de Calidad	5		0,39	0,25
Visualizador	4	4	0,33	0,18
Bomba Achique	3	2	0,38	0,31
Protecciones eléctricas	3		0,84	0,09
SCADA	2	1	0,15	0,03
Sist. Dosificación Sulfato	2		0,20	0,14
Equipo laboratorio (Calidad)	2		0,15	0,04
Falla General de las Comunicaciones	1		4,75	0,67
Medidor de Energía	1	1	0,25	0,13
Bomba Muestra	1		0,14	0,04
Falla Múltiple	1	1	2,13	0,10
Total	568	180	183,68	35,25

Fuente: Repositorio del Dpto. de Telemando

Con la información anterior se realizó un diagrama de Pareto para determinar el 20% de las fallas que más afectan el funcionamiento continuo de las estaciones de tratamiento.

Ilustración 4 . Diagrama de Pareto de fallas Estaciones de Tratamiento



Elaboración propia.

Dando como resultado que:

- ✚ Los tipos de fallas que representa el 80% de los mantenimientos correctivos realizados en la empresa de Aguas de Cartagena son las siguientes: Sistema de Cloración, RTU, Caudalímetro, Actuador, Radiocomunicación, Falla Externa, Sensor Presión, Sensor Nivel y Fallo Control.
- ✚ La eliminación de los pocos vitales disminuiría en un 80% la cantidad de los correctivos que se ejecutan.
- ✚ Se observa que la falla más recurrente se presenta en el sistema de Cloración con una frecuencia de 133 veces en las estaciones de tratamiento.
- ✚ Si se elabora un programa de mantenimiento adecuado se eliminarían el 80% de las causas presentadas.

4.1.2. Análisis causa raíz mediante la herramienta Árbol lógico de fallas

El análisis cualitativo de una falla cuenta con diversas herramientas para realizar el análisis de causa raíz, lo importante de la herramienta que se utilice es que los resultados a obtener sean acertados y precisos. Todas estas herramientas tienen algo en común, que trabajan mediante la relación de las causas y defectos para encontrar las causas posibles de la falla de una manera organizada.

Con el diagrama de Pareto realizado se logra determinar que el evento o mal actor es el Sistema de Cloración de las estaciones., por lo tanto, se plantea el árbol lógico de fallas en función de ello.

Así mismo se evalúa los procesos que afecta esta falla, y el 80% este centralizado en el proceso de dosificación.

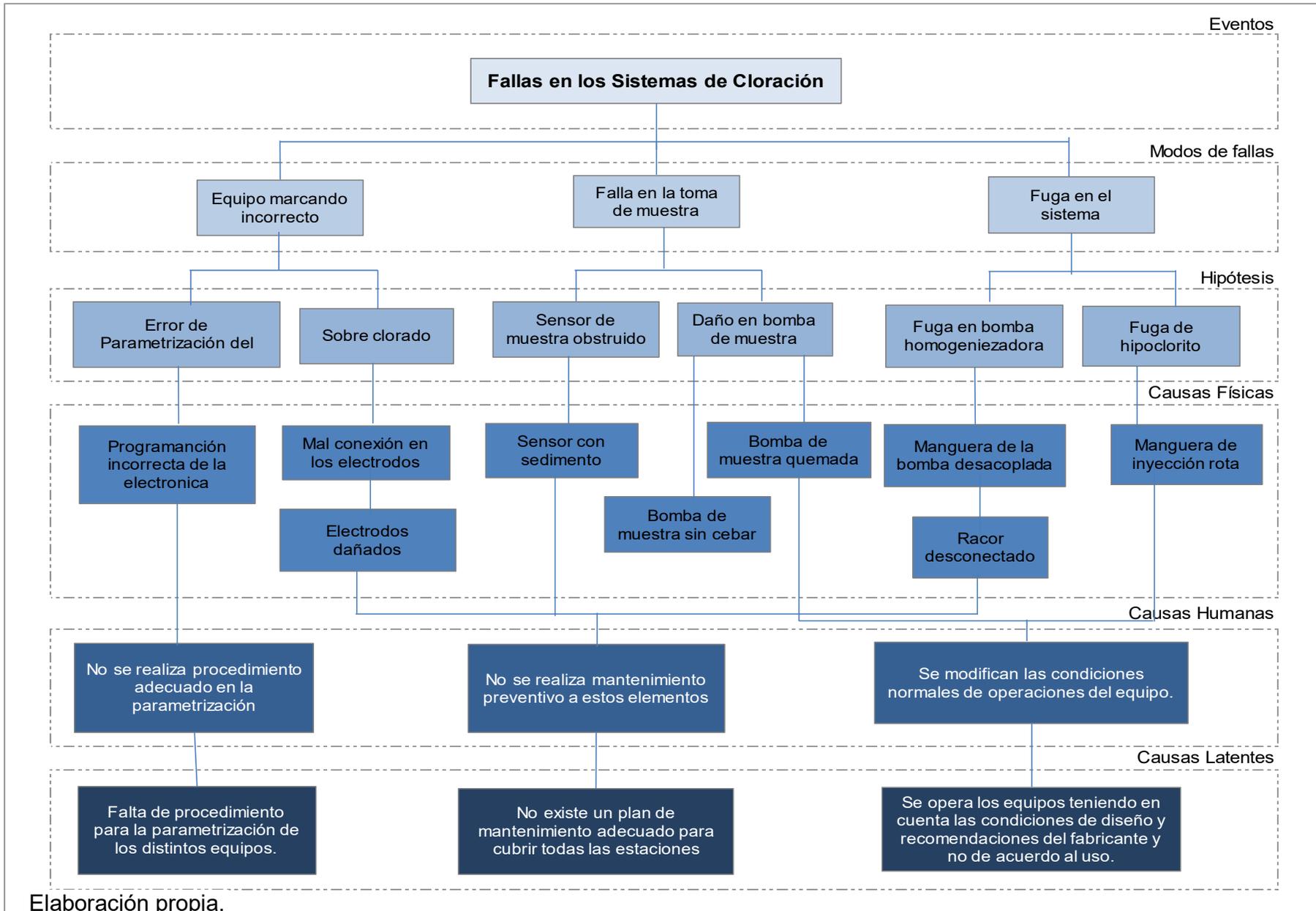
Tabla 8 - Procesos con mayor N° de falla

Proceso	N° de repeticiones de la falla
Dosificación	106
Monitoreo	19
Medición	3
monitoreo y medición	2
Monitoreo y Dosificación	2
Control	1
Total general	133

Elaboración Propia.

A continuación, se plantea el árbol lógico de fallas de acuerdo con la información recolectada.

Ilustración 5 - Árbol Lógico de Fallas Sistema de Cloración



Elaboración propia.

Del árbol lógico de fallas se concluye que las posibles causas latentes por las que se presenta la falla del sistema de cloración son:

- ✚ Falta de procedimiento para la parametrización de los distintos equipos de las estaciones.

- ✚ No existe un cronograma de mantenimiento adecuado para cubrir todas las estaciones de tratamiento.

- ✚ Se operan los equipos teniendo en cuenta las condiciones de diseño y recomendaciones del proveedor y no de acuerdo con el uso de esto en las estaciones.

4.2. DESARROLLO DEL OBJETIVO ESPECIFICO N°2

Determinar la priorización de los procesos más afectados mediante un modelo de criticidad de factores ponderados identificando así las estaciones de tratamiento que requieren más control y mantenimiento.

Se realizó un análisis de criticidad que nos permite identificar y jerarquizar por su importancia los elementos de una instalación sobre los que vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos). Para el del análisis de las estaciones de tratamiento de Acucar se propone seguir la metodología desarrollada por la Consultoría Inglesa “The Woodhose Partnership Limited”, llamada el modelo de criticidad “Factores ponderados basados en el riesgo”. Este modelo está basado en el concepto del riesgo así:

- Criticidad Total = Frecuencia x Consecuencia.
- Frecuencia = Rango de fallas en un tiempo determinado (Fallas/año)
- Consecuencias = (Impacto operacional x Flexibilidad) + Costo de Mtto + Impacto seguridad y ambiente.⁹

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo se presentan a continuación:

⁹ Pesántez, A. (2007) *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

Ilustración 6 – Criterios y Cuantificación de Frecuencias y Fallas.

Criterios para determinar la “<u>Criticidad</u>”	Cuantificación
<u>Frecuencias de Falla:</u>	
✓ Mayor a 4 fallas/mes	4
✓ 2-4 fallas/mes	3
✓ 1-2 fallas/mes	2
✓ Mínimo 1 falla/mes	1

<u>Impacto Operacional:</u>	
• Parada inmediata de toda la empresa	10
• Parada de toda la planta (recuperable en otras plantas)	8
• Impacto en los niveles de producción o calidad	6
• Repercute en costos operacionales adicionales (indisponibilidad)	3
• No genera ningún efecto o impacto significativo sobre las demás operaciones	1
<u>Flexibilidad Operacional:</u>	
❖ No existe opción de producción y no hay forma de recuperarlo	5
❖ Hay opción de producción a la capacidad mínima permisible	4
❖ Hay opción de repuesto compartido	3
❖ Función de repuesto disponible	1
<u>Costos de Mantenimiento:</u>	
◦ Mayor o igual a \$3,000	2
◦ Menor a \$3,000	1
<u>Impacto en la seguridad ambiental y humana:</u>	
➤ Afecta la seguridad humana tanto externa como interna	8
➤ Afecta el ambiente produciendo daños irreversibles	6
➤ Afecta las instalaciones o personas causando daños severos	4
➤ Provoca daños menores causando daños leves en las personas	3
➤ Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
➤ No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o el medio ambiente	1

Fuente: Pesántez, (2007) *Elaboración*

A. *de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los*

Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.

- **FRECUENCIA DE FALLAS**

Primero definimos la frecuencia de falla de las estaciones a analizar, cuantificando las frecuencias de fallas con un valor, para así de esta manera determinar cuáles son las estaciones más críticas. Para ello nos basamos en la información suministrada por la empresa.

Tabla 9 - Frecuencia de Fallas

PROCESO	FRECUENCIA (FALLA/MES)	CUANTIFICACIÓN
Bombeo	3	3
Comunicación	3	3
Control	1	2
Control de Motores	4	3
Control Válvulas	1	2
Dosificación	13	4
Monitoreo	13	4
Monitoreo y control	4	3
Monitoreo y Medición	4	3

Elaboración Propia

- **CONSECUENCIAS DE LAS FALLAS**

Ahora se desarrollamos la forma en cómo se analizará las consecuencias de las fallas para así poder determinar el segundo factor de la fórmula de criticidad total, el cual se calcula con la siguiente fórmula:

Consecuencias = (Impacto operacional x Flexibilidad) + Costo de Mtto + Impacto seguridad y ambiente.

- **IMPACTO OPERACIONAL**

Tabla 10 - Impacto Operacional

PROCESO	CONSECUENCIA	CUANTIFICACIÓN
Bombeo	Parada de toda la planta (Recuperable en otras plantas)	10

Comunicación	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Control	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Control de Motores	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Control Válvulas	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Dosificación	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Monitoreo	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Monitoreo y control	Impacto en los niveles de producción o calidad	6
Monitoreo y Medición	Impacto en los niveles de producción o calidad	6

Elaboración Propia

- **FLEXIBILIDAD OPERACIONAL**

Tabla 11 - Flexibilidad Operacional

PROCESO	FLEXIBILIDAD	CUANTIFICACIÓN
Bombeo	Hay opción de producción a la capacidad mínima permisible	4
Comunicación	Función de repuesto disponible	1
Control	Hay opción de repuesto compartido	3
Control de Motores	Hay opción de repuesto compartido	3
Control Válvulas	Hay opción de repuesto compartido	3
Dosificación	Hay opción de producción a la capacidad mínima permisible	4
Monitoreo	Hay opción de repuesto compartido	3
Monitoreo y control	Hay opción de repuesto compartido	3
Monitoreo y Medición	Hay opción de repuesto compartido	3

Elaboración Propia

- **COSTOS DE MANTENIMIENTO**

Tabla 12 - Costos de Mantenimiento

PROCESO	COSTOS DE OPERACIÓN	CUANTIFICACIÓN
Bombeo	Mayor o igual al 40% del equipo	2

Comunicación	Menor al 40% del equipo	1
Control	Menor al 40% del equipo	1
Control de Motores	Mayor o igual al 40% del equipo	2
Control Válvulas	Menor al 40% del equipo	1
Dosificación	Mayor o igual al 40% del equipo	2
Monitoreo	Mayor o igual al 40% del equipo	2
Monitoreo y control	Mayor o igual al 40% del equipo	2
Monitoreo y Medición	Mayor o igual al 40% del equipo	2

Elaboración Propia.

- **IMPACTO EN LA SEGURIDAD AMBIENTAL Y HUMANA**

Tabla 13 - Impacto S.A.H

PROCESO	IMPACTO S.A.H.	CUANTIFICACIÓN
Bombeo	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Comunicación	No provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o en el medio	1
Control	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Control de Motores	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Control Válvulas	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Dosificación	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Monitoreo	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Monitoreo y control	Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas establecidas para el entorno	2
Monitoreo y Medición	No provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o en el medio	1

Elaboración Propia

4.2.1. Cálculo de Criticidad

Basado en lo expuesto por Pesántez, A. (2007), una vez realizado el análisis de las frecuencias de fallas y sus causas, el cálculo de la criticidad de cada proceso se le efectúa con base a la siguiente formula:

- Criticidad Total = Frecuencia x Consecuencia.

El cálculo de la criticidad total de cada proceso nos va a dar el principal indicador para establecer cuál es el proceso de mayor criticidad, lo cual se obtuvo la siguiente tabla de resultados:

Tabla 14 - Resultados del Cálculo de Criticidad

PROCESO	FRECUENCIA	CONSECUENCIA	CRITICIDAD TOTAL
Bombeo	3	44	132
Comunicación	3	8	24
Control	2	21	42
Control de Motores	3	22	66
Control Válvulas	2	21	42
Dosificación	4	28	112
Monitoreo	4	22	88
Monitoreo y control	3	22	66
Monitoreo y Medición	3	21	63

Elaboración Propia.

4.2.2. Matriz de criticidad de Procesos

Con base a la información de la tabla 13 se plantea la matriz de criticidad para determinar cuáles son los procesos que están afectando el funcionamiento de las estaciones de tratamientos.

Ilustración 7 -Matriz de Criticidad

F R E C U E N C I A	4		Monitoreo	Dosificación		
	3		Comunicación Control de Motores Monitoreo y control Monitoreo Y Medición		Bombeo	
	2		Control Control de Válvulas			
	1					
		(3-12)	(13-24)	(25-36)	(37-48)	(49-60)
CONSECUENCIAS						

Elaboración Propia.

Luego de realizar la matriz de criticidad sobre la base de los cálculos previos, se puede concluir que los procesos que presenta mayor criticidad son los de Bombeo como un proceso muy crítico, Dosificación y Monitoreo como crítico. Por tanto, a continuación, se muestran aquellas estaciones donde este proceso ha afectado con recurrencia en los últimos 6 meses para tener una muestra significativa de las fallas, dando como resultado las siguientes tablas:

Tabla 15 - Estaciones Críticas por el proceso de Dosificación

ESTACIONES	FRECUENCIAS DE FALLAS
EBAP Zona Norte	22
EBAP Tanque Colinas	21
EBAP Tanque Mohán	17
EMAP Lomas PTA	14
EBAP Tanque Carmelo	12
EMAP Mamonal	10
EBAP Tanque Nariño	9
ETAP Paraguay	4
EBAP Membrillar	2
ETAP Piedrecitas	1
Total	112

Elaboración Propia.

Tabla 16 - Estaciones Críticas por el proceso de Bombeo

Proceso	FRECUENCIAS DE FALLAS
EBAP Tanque Ararca	4
EBAR Caracucha	4
EBAP Tanque Colinas	4
EBAR Zapatero	3
EBAR Blas de Lezo	3
ETAP Paraguay	3
EBAR Matuna	2
EBAP Booster	2
EBAR Punta Canoa	2
EBAR Cielo mar	2
EBAR Hospital Naval	2
Blas de Lezo bombeo PTA	2
EBAR Bocagrande	2
EBAC Piedrecitas	1
EBAR Bellavista	1
EBAR Ricaurte	1
EBAR Laquito	1
EBAR El Bosque	1
EBAP Santa Lucia	1
EBAP Zona Norte	1
Total	42

Y dentro de las estaciones más significativas del proceso de monitoreo se encuentran las siguientes estaciones:

Tabla 17 - Estaciones Críticas por el proceso de Monitoreo

ESTACIONES	FRECUENCIAS DE FALLAS
ETAP Paraguay	20
EBAC Albornoz	16
EBAC Dolores	12
EBAR Laquito	10
EBAP Booster	8
EBAP Tanque Colinas	8
EBAC Piedrecitas	6
EBAR Hospital Naval	6
EMAP Alcibia	5
EMAP Punta Canoa	5
EMAP Socorro	5
EBAP Tanque Mohán	5
Bombeo Nariño-Colinas PTA	4
ETAR Punta Canoa	4

EBAR Paraíso	4
Consola de Operadores PTA	4
Filtros P3 PTA	4
Total	126

Elaboración Propia.

Se concluye que las estaciones que más se afectan por estos 3 procesos son las de bombeo las cuales si fallan se ve afectado el proceso de distribución de agua potable y el Alcantarillado. Dentro de las estaciones más críticas se encuentran: EBAP Zona Norte, EBAP Tanque Colinas, ETAP Paraguay, EBAC Piedrecitas.

Por otro lado, al ser considerado crítico el proceso de dosificación por parte de la matriz de criticidad, se han tenido en cuentas las estaciones que se asocian a este proceso y referencian los sistemas de cloración; estas estaciones son: EBAP zona Norte, EBAP Tanque Colinas, EMAP Mohán, EMAP Lomas, EMAP Carmelo y EMAP Mamonal, estaciones que en el desarrollo de la funcionalidad del sistema de dosificación impacta de manera directa a la calidad del agua ya potabilizada y por ello a la salubridad de los usuarios que hacen uso de la misma.

4.3. DESARROLLO DEL OBJETIVO ESPECIFICO N°3

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo en los sistemas de instrumentación y control de las estaciones de tratamiento mediante un cronograma de trabajo teniendo en cuenta la priorización logrando así la reducción de los tiempos medios entre las fallas y los tiempos de solución.

Para el desarrollo del cronograma de mantenimiento preventivo del presente trabajo se tiene en cuenta los siguientes aspectos: criticidad de las estaciones según su funcionamiento, tipo de sistema operativo y su ubicación.

4.3.1. Grupos de Estaciones según su criticidad

De acuerdo con la información obtenida de la matriz de criticidad se concluyó la criticidad de las estaciones con base a los procesos que éstas realizan. Por tanto, se agruparon las estaciones de la siguiente manera:

- **Estación Subeléctrica** es la encargada de suministrar la energía eléctrica a las estaciones de agua cruda, y es la estación de Membrillal.
- **Estaciones de bombeo** son las más críticas para el sistema porque si una falla se para todo el funcionamiento de la distribución de agua potable o recolección del agua de Alcantarillado. Actualmente Acuacar cuenta con 26 estaciones las cuales son: Ararca, Bella Vista, Bocagrande, Bombeo Nariño-Colinas PTA, Bosque, Ceballos, Ebar Blas de Lezo, Ebar Nelson Mandela, Ebar Pastelillo, El Laguito, El Oro, Hospital Naval, La Matuna, María Auxiliadora, Membrillal, Paraíso, Pasacaballo, PTAR Punta Canoa, Puente Jiménez, Ricaurte, Santa Lucia, Tabú, Tanque Colinas, Tanque Lomas PTA, Torices y Zona Norte.
- **Estaciones de Monitoreo y Control** son semicríticas y hay 45 que son: Alcibia, Barrio Militar, Blas de Lezo PTA, Booster, Boquilla, Bosque PTA, Carmelo PTA, Casa Justicia Olaya, Centro de Control, Chile PTA, Colclinker, Consola de Operadores PTA, Consulado PTA, Cospique, Crespo, Darsena de Lodos PTA, Ecopetrol, El Pozón, El Rodeo, Espinal, Fredonia, Gambote Caudal, Gyptec, Lamitech, Maltería, Mamonal, Mohán, Monserrate, Mop, Nelson Mandela, PetCol, Petroquímica, Pie de la Popa, Pontezuela, Propilco, Punta Canoa, Santa Clara, Sociedad Portuaria, Socorro, Tanque Carmelo, Tanque Morros, Tanque Nariño, Termocandelaria, Villa Venecia y Zona Sur Oriental PTA.
- **Estaciones de Agua cruda** son las estaciones que distribuyen el agua cruda hasta la planta de Tratamiento de Paraguay, pero para el Dpto. de Telemando no son tan críticas porque tiene personal operativo continuo que vigilan su operación, son 5 estaciones: Piedrecita, Gambote, Dolores, Conejos y Albornos, estas estaciones están por fuera de la periferia de la ciudad.

4.3.2. Tipo de sistema operativo de las Estaciones

Con base a la clasificación anterior de la criticidad de las estaciones se realizó el análisis del tipo de sistema que tienen cada una de ellas, si son manuales,

semiautomáticas y completamente automáticas; para así determinar cuáles son las estaciones que requieren un mayor seguimiento y plantearlo en el cronograma del mantenimiento preventivo.

Tabla 18 - Tipo de sistema operativo de las Estaciones

Tipo de Estación	Estación	Tipo de sistema Operativo
Estación Subeléctrica	SSE Membrillal	Automático
Estación de Bombeo	Ararca, Bombeo, Nariño-Colinas PTA, Membrillal, Santa Lucía, Tanque Colinas, Tanque Lomas PTA, Zona Norte	Automático
	Bella Vista, Bocagrande, Bosque, Ceballos, Ebar Blas de Lezo, Ebar Nelson Mandela, Ebar Pastelillo, El Laguito, El Oro, Hospital Naval, La Matuna, María Auxiliadora, Paraíso, Pasacaballo, PTAR Punta Canoa, Puente Jiménez, Ricaurte, Tabú, Torices.	Semiautomático
Estaciones de Monitoreo y Control	Centro de Control, Consola de Operadores PTA, Mohán, Tanque Morros, Tanque Nariño	Automático
	Alcibia, Barrio Militar, Blas de Lezo PTA, Booster, Boquilla, Bosque PTA, Carmelo PTA, Casa Justicia Olaya, Chile PTA, Colclinker, Consulado PTA, Cospique, Crespo, Darsena de Lodos PTA, Ecopetrol, El Pozon, El Rodeo, Espinal, Fredonia, Gambote Caudal, Gyptec, Lamitech, Malteria, Mamonal, Monserrate, Mop, Nelson Mandela, PetCol, Petroquímica, Pie de la Popa, Pontezuela, Propilco, Punta Canoa, Santa Clara, Sociedad Portuaria, Socorro, Tanque Carmelo, Termocandelaria, Villa Venecia, Zona Sur Oriental PTA	Semiautomático
Estaciones de Agua Cruda	Dolores, Conejos, Piedrecitas, Gambote y Albornoz.	Manual

Elaboración Propia.

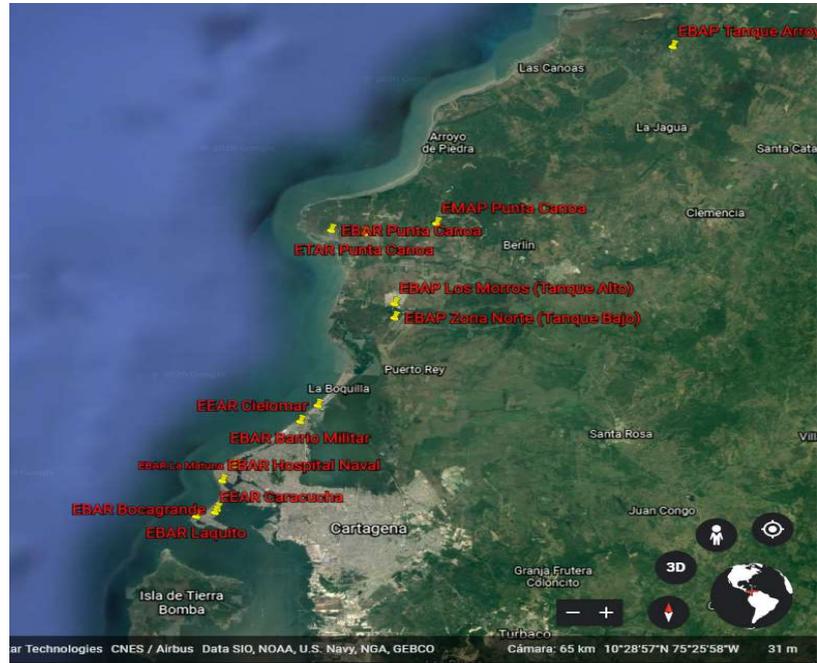
4.3.3. Zonificación de las Estaciones

Para realizar la zonificación de las estaciones se tuvieron en cuenta el tipo de criticidad y la ubicación de estas, quedando agrupada en 7 zonas de la siguiente manera:

Zona A

La zona A cuenta con 13 estaciones todas ubicadas en la zona norte de la ciudad que van desde El Laguito hasta la EBAP Tanque Arroyo Grande.

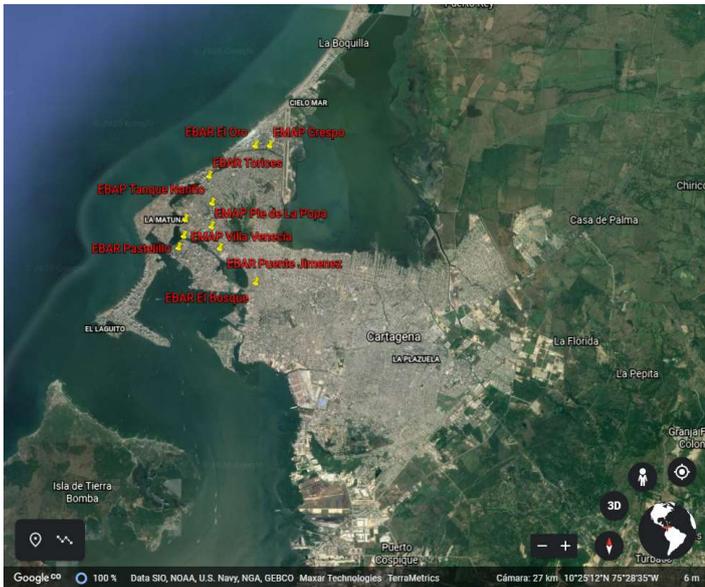
Ilustración 8 - Estaciones de la zona A



Fuente: Google Earth

Zona B

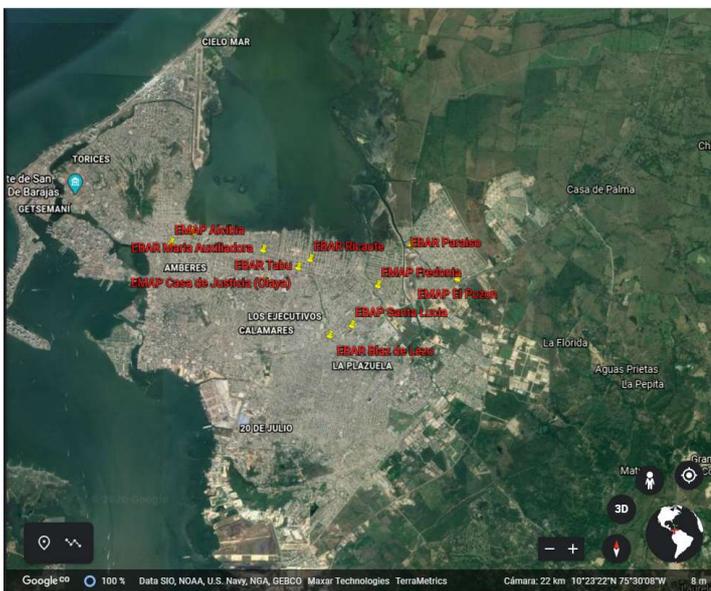
Ilustración 9 - Estaciones de la zona B



Fuente: Google Earth

Zona C

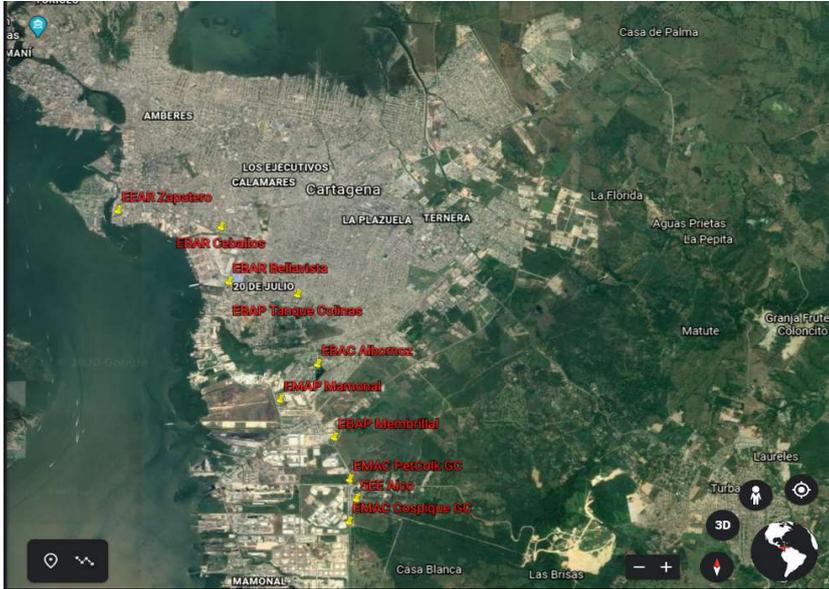
Ilustración 10 - Estaciones de la zona C



Fuente: Google Earth

Zona D

Ilustración 11 - Estaciones de la zona D



Fuente: Google Earth

Zona E

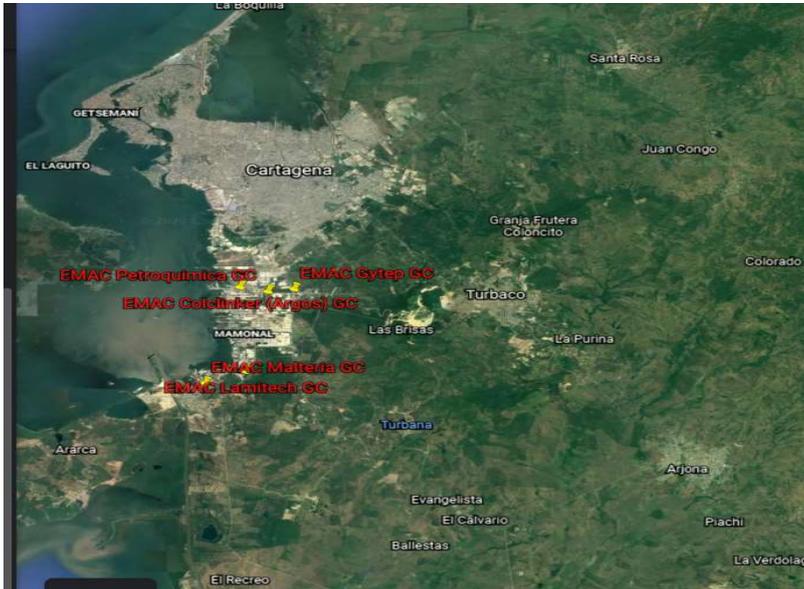
Ilustración 12 - Estaciones de la zona E



Fuente: Google Earth

Zona F

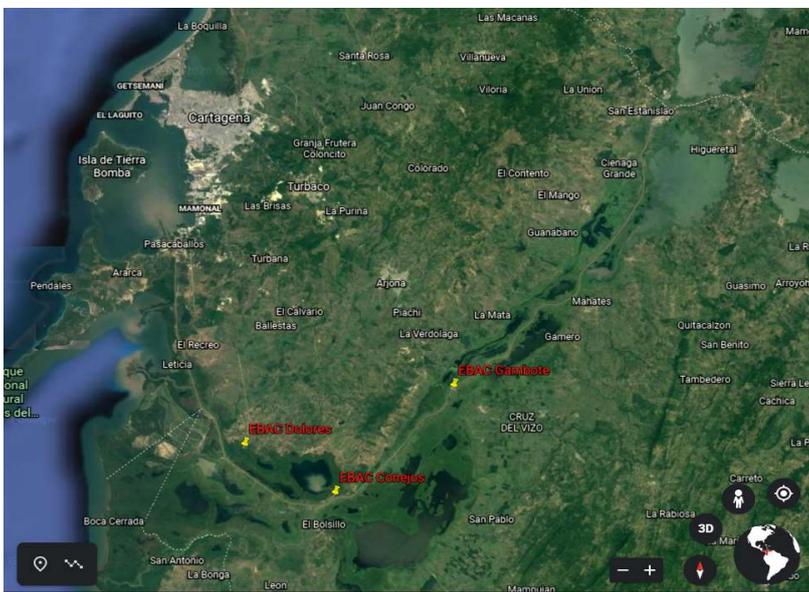
Ilustración 13 - Estaciones de la zona F



Fuente: Google Earth

Zona G

Ilustración 14 - Estaciones de la zona G



Fuente: Google Earth

4.3.4. Cronograma de mantenimiento de las estaciones

Con base a la información de los puntos anteriormente mencionados 4.3.1., 4.3.2. y 4.3.3, se realizó una tabla en la cual está la información de la estación, la criticidad, Periodicidad de los mantenimientos, los mantenimientos anuales, tipo de estación y 5 descripciones de acuerdo con el proceso que realicen.

- **Criticidad:** Con relación a la información del numeral 4.2.2. y con acompañamiento del personal de Aguas de Cartagena, se estableció un rango para clasificar a las estaciones de 1-5, siendo el 5 una estación muy crítica y el 1 no crítica.
- **Periodicidad de los Mantenimientos:** Dependen del rango de la criticidad cuan más crítico es la estación la periodicidad del mantenimiento es más corta, quedando establecido de la siguiente manera:

Criticidad (1-5)	Periodicidad de los Mantenimientos (Días)
5	30
4	60
3	90
2	105
1	120

- **Procesos:** En la tabla se indican cuáles son los procesos que se ejecutan en cada una de las estaciones siendo estos: Monitoreo, Control, Bombeo, Postcloración y Planta de tratamiento.

Con la información de la tabla 18 se plantea el cronograma de mantenimiento de las estaciones hasta la semana N° 25 de trabaja, como se puede evidenciar en la ilustración N° 15.

Estaciones	Criterio de Mtto	Grupo	Zona	Periodicidad Matenimientos En Semanas	Periodicidad Matenimientos M	Matenimientos Anuales	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25
Tanque Colinas	5	D	6	8	2	6																									
Ceballos	4	D	6	8	2	6																									
Bella Vista	4	D	6	8	2	6																									
Ebar zapatero	4	D	6	8	2	6																									
Santa Clara	2	D	6	16	4	3																									
SEE Membrilla	5	D	9	8	2	6																									
Mamonal	3	D	9	8	2	6																									
Ecopetrol	3	D	9	8	2	6																									
PetCol	3	D	9	8	2	6																									
Membrillal	3	D	9	8	2	6																									
Cospique	3	D	9	8	2	6																									
Propilco	3	D	9	8	2	6																									
Albornoz	1	D	9	16	4	3																									
Tanque Carmelo	4	E	8	8	2	6																									
Nelson Mandela	1	E	8	8	2	6																									
Ebar Nelson Mandela	4	E	8	8	2	6																									
Mop	2	E	8	16	4	3																									
El Rodeo	1	E	8	16	4	3																									
Socorro	1	E	8	16	4	3																									
Booster	4	E	11	8	2	6																									
Ararca	4	E	11	8	2	6																									
Mohan	4	E	11	8	2	6																									
Pasacaballo	4	E	11	8	2	6																									
Piecrecitas	1	E	11	16	4	3																									
Colclinker	3	F	10	12	3	4																									
Petroquímica	3	F	10	12	3	4																									
Malteria	3	F	10	12	3	4																									
Lamitech	3	F	10	12	3	4																									
Sociedad Portuaria	3	F	10	12	3	4																									
Gyptec	3	F	10	12	3	4																									
Termocandelaria	3	F	10	12	3	4																									
Gambote	1	G	12	16	4	3																									
Conejos	1	G	12	16	4	3																									
Dolores	1	G	12	16	4	3																									
Gambote Caudal	1	G	12	16	4	3																									

Elaboración Propia de archivo en Excel

4.3.5. Beneficios del Cronograma de Mantenimiento

Por medio de este plan de mantenimiento la empresa tendría beneficios para la reducción de los tiempos de solución de las fallas que se presenta con mayor frecuencia en las estaciones de bombeo, monitoreo y control, ya que por medio del árbol de falla se conocieron causas latentes que pueden estar afectado a todos los procesos que se realizan y en numeral 5.2. se realizan unas recomendaciones que ayudarán a llevar a cabo el cronograma de mantenimiento y este sea óptimo.

Igualmente se reduciría los tiempos muertos invertido en reparaciones, es decir las paradas que se realizan en las estaciones al ejecutar una corrección, manteniendo así la disponibilidad de equipos al tenerlos en condiciones óptimas, permitiendo a todo el personal de Telemando una visión general y objetiva de la priorización de las estaciones y la periodicidad recomendada para realizar los mantenimientos

Así mismo se generaría un gran impacto en las horas extra que paga la empresa porque actualmente el índice de las extras está asociado con el 70% del tiempo invertido en las soluciones de falla siendo este de **\$ 8.799.300** en estos últimos 6 meses y con el plan se busca reducir las fallas en un 40%, manteniendo el mismo tiempo promedio de solución por fallas y el mismo costo de las horas, este indicador disminuiría a **\$ 4.883.940**, De igual forma, los costos asociados a combustibles que ascienden a **\$ 3.456.000** se reduciría a **\$ 2.073.600**; igualmente en los gastos por repuestos mensuales siendo este el ahorro más significativo en el Dpto.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

5.1. CONCLUSIONES

Actualmente con la era de transición que sufre el mundo, el buen funcionamiento de los equipos es un factor decisivo en la rentabilidad y la competitividad de cualquier empresa. De los procesos más críticos para reducir los costos de operación y aumentar el retorno de inversión para sus activos es y el mantenimiento de todos los sistemas, maquinarias y herramientas utilizadas para las operaciones que realice las organizaciones.

La importancia del mantenimiento radica en los diversos beneficios que genera, desde alargar la vida útil de los equipos, hasta reducir costos y consumo de energía y no solo está enfocado a las fallas que surjan mientras esta en marca en proceso productivo o la prestación del servicio.

Para el desarrollo del presente trabajo se realizó un diagrama de pareto para determinar las principales fallas en las estaciones y se determinó el evento y se planteó el análisis de causa raíz, Luego se priorizaron las estaciones de acuerdo con el modelo de criticidad de factores ponderados y por medio de la matriz de criticidad se logró determinar cuáles eran los procesos más críticos de las estaciones y así se verifico como estos afectan el funcionamiento de las estaciones y por último se diseñó el plan de mantenimiento acorde al análisis realizado, por consiguiente, al implementar las herramientas ya mencionadas en el capítulo 4.

Con respecto al diagnóstico que se hizo a los datos de los resultados del Dpto. Telemando en el cumplimiento del mantenimiento se puede evidenciar que no es el más adecuado teniendo en cuenta el funcionamiento de las estaciones, sus equipos y los procesos que cada uno lleva; no tenían clasificado los aspectos que en este estudio se trabajaron como, los criterios de ubicación geográfica, los tipos de procesos, el sistema de las operaciones y la criticidad de cada estación, estos aspectos desarrollados nos llevó a diseñar un nuevo plan de mantenimiento generando un cronograma que pueda satisfacer el cumplimiento total de este mismo en cada una de las estaciones del Dpto. de Telemando.

Este nuevo plan propuesto tiene como beneficios disminuir los mantenimientos correctivo en cada uno de los equipos y así poder generar un menor impacto de la afectación de los servicios que cada uno de estos sistemas brindan. Con el nuevo cronograma apuntamos a la disminución del desplazamiento de los operarios a cada

una de las estaciones mejorando los indicadores que le apuntan a la productividad, como el tiempo medio entre falla y el tiempo promedio de solución al tener en cuenta la ubicación geográfica de cada una de las estaciones y zonificarlas de acuerdo con los criterios ya trabajados.

Para el logro de todo ello, es muy importante que todas las personas que intervienen en el proceso conozcan las partes fundamentales de los equipos que cuenta cada estación de tratamiento de Acuacar, para poder mantenerlos operando de la mejor manera y tener los repuestos a tiempo. Para ello, es importante tener en cuenta los manuales de reparación, las listas de repuestos, los manuales de operación, los intervalos de mantenimiento y los ciclos de vida de cada equipo y sobre todo las condiciones a los que estos están expuestos al ejecutar las actividades.

Finalmente, realizar un cronograma del mantenimiento preventivo identificando cada variable que intervienen en las condiciones que se dan al desarrollar cada proceso es muy fundamental para cualquier empresa porque ayuda a minimizar gastos y hacer más rentable el negocio, y evitando paradas significativas como en este caso de Aguas de Cartagena que impactan directamente al usuario.

5.2. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se realizan de acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis de las visitas a la empresa.

1. Desarrollar procedimientos claros de acuerdo con cada actividad realizada en función a los equipos que tiene instalados en las estaciones.
2. Realizar capacitaciones especializadas en las que se dé la transferencia de conocimiento con los proveedores de los equipos.
3. Operar los equipos en el contexto operacional idóneo, teniendo en cuenta las características de las estaciones de tratamiento y el tiempo de funcionalidad de está.
4. Realizar inspecciones periódicas teniendo en cuenta las variables de afectación de los equipos y prevenir las fallas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anzola, F. and Pradhan, S. (1992). *Maintenance Strategies for Greater Availability*. Maintenance & Retrofitting, p. 39.

Argumedo Bossio, A., & Marrugo Mejía, A. (2016). *Estado del arte de la automatización en la empresa Aguas de Cartagena S.A. E.S.P.* Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica Bolívar. Obtenido de:
<https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0043890.pdf>

Arias, F. (2014). *El Proyecto de investigación*. Caracas: Episteme.

autores, V. (2018). *Plan de desarrollo quinquenal 2017 – 2021. “Servicio municipal de agua potable y alcantarillado”*. Cochabamba-Bolivia: Alcaldía de Cochabamba.

Azócar, R. (2017). *El proyecto factible*. Caracas: Fondo Editorial El Perro y La Rana.

Duran, J. (1 de Octubre de 2003). Nuevas Tendencias en el Mantenimiento En la Industria Eléctrica. Obtenido de <http://www.mantenimientomundial.com/notas/duranVE1.pdf>

Espín Leal, P. (2016). *Gestión de activos*. Sistema de gestión integral para empresas de abastecimiento de agua. Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica de Cartagena.

Expósito García, A. y. (2006). *Análisis del coste del servicio de abastecimiento urbano de agua en la Demarcación del Guadalquivir*. (Tesis de Pregrado) Argentina: Universidad de Córdoba.

Garrido, S. G. (2009). *Ingeniería del Mantenimiento. Manual Práctico para la gestión eficaz del mantenimiento*. Obtenido de Renovetec: <http://www.renovetec.com/ingenieria-del-mantenimiento.pdf>

Lagoas, M. Diagrama de Pareto. Universidad de Vigo. España. Obtenido de:
<http://gio.uvigo.es/asignaturas/gestioncalidad/GCal0405.DiagramaPareto.pdf>

- Moncada, D. (2009). Seminario en Metodología de Análisis de Fallas. (Tesis Pregrado). Universidad de Santander. Bucaramanga.
- Martínez, M. (2014). *Paradigma Emergente*. México: Trillas.
- Meléndez, J. (2010). *Modelo gerencia de Mantenimiento del Sistema de Control Distribuido (DCS) marca HONEYWELL en la GRB ECOPETROL*. (Tesis de Posgrado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Moubray, J. (1997, Ferbrero 01). *Applying and Implementing Risk-based Inspection Programs*. Maintenance & Reliability. Hydrocarbon Processing, p.43.
- Pesántez, A. (2007). *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo y Preventivo en Función de la Criticidad de los Equipos del Proceso Productivo de una Empresa Empacadora de Camarón*. (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador.
- Sánchez, A. (2017). *Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, en las bombas G-4204 A/B de la unidad de THDA*. Valencia, Venezuela: Universidad de Carabobo.
- Sanzol, L. & Martínez, P. (2010). Implementación de Plan de mantenimiento TPM en Planta de Cogeneración. (Tesis de Pregrado). Universidad Pública Navarrens. Pamplona.
- Sierra, G. (2004). *Programa de mantenimiento preventivo para la empresa Metalmecánica Industrias AVM S.A.* (Tesis de Pregrado) Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Tamayo, M. (2012). *El proceso de investigación científica*. Bogotá: Limusa.
- Ticlavilca, J. (2016). Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad mecánica del equipo ALPHA20 de la empresa Robocon SAC. (Tesis de Pregrado) Obtenido de Repositorio Web de la Universidad Nacional del Centro del Perú: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3657/Ticlavilca%20Rauz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Valdivieso, J. (2010). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa EXTRUPLAS S.A.* (Tesis de Pregrado) Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca.

Vera, H. (2011). *Aplicación de la metodología Análisis Cauda raíz (RCA) para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la SOM – ECOPETROL S.A.* (Tesis de Pregrado) Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Obtenido de:
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/138036.pdf>

Villegas, L. (2006). *Propuesta para el control del mantenimiento preventivo y correctivo, mediante el uso de un paquete de computación, en la planta geotérmica ORZUNIL 1.* (Tesis de Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala.