

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DEL
CONCENTRADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA DE
PEPSI-COLA VENEZUELA, PLANTA SAN PEDRO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Chourio C. Angélica M.,
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DEL
CONCENTRADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA DE
PEPSI-COLA VENEZUELA, PLANTA SAN PEDRO**

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. Rafael Martín
Prof. María Rincones

TUTOR INDUSTRIAL: Jerry Abache

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Chourio C. Angélica M.,
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, Junio 2010

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Angélica M. Chourio C., titulado:

**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DEL
CONCENTRADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA DE
PEPSI-COLA VENEZUELA, PLANTA SAN PEDRO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Profa. Adriana García
Jurado

Prof. Francisco Yáñez
Jurado

Prof. Rafael Martín.
Profa. María Rincones.
Jurado

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a la Virgen y a San Josemaría Escrivá por iluminarme y bendecirme todos los días de mi vida.

A mis padres Nancy y Edgar, por ser unas personas maravillosas, gracias por apoyarme en todos los momentos sin ustedes nada hubiese sido posible. Mami y Papi gracias por todo lo que me dan cada día, por amarme como lo hacen.

A mi abuelita Celeste, eres la mejor abuela del mundo. Gracias por ser todas tus bendiciones, por ser tan hermosa y especial conmigo. Te quiero muchísimo abuelita.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela y a la Escuela de Ingeniería Química por ser la casa que me brindó el conocimiento.

A Pepsi-Cola Venezuela, Planta San Pedro, a la Lic. Carmen López y Jerry Abache por brindarme la oportunidad de ser parte de esa gran familia y darme todo el apoyo para desarrollar mi trabajo especial de grado.

A mi tutor el Prof. Rafael Martin Belmonte, gracias por su dedicación, apoyo, ayuda incondicional, gracias por ser una importante guía en el desempeño de mi trabajo especial de grado. Estaré siempre orgullosa de haber contado con una persona como usted. Que Dios lo tenga en la gloria, usted en el cielo y su legado trabajando en la tierra.

A la Prof. María Rincones, gracias por su paciencia, ayuda, conocimiento y apoyo brindado.

A Ricardo Olejnik gracias por ser parte de mi vida, por cada una de tus palabras y tus consejos, y por estar siempre en todos los momentos de mi vida. Te amo mi amor.

A mis hermanos Carolina, Juan Pablo y Miguel Angel, a todos mis amigos y compañeros y especialmente a Mariana, Karelys, primo Angel, Housam, Jeniffer, Robert, Sara y Maryori gracias por hacer los momentos de mi vida más felices.

Gracias a todas las personas que de alguna manera influyeron en mi e hicieron que cumpliera la esta meta de ser Ingeniero Químico egresada de la Universidad Central de Venezuela.

A todos mil gracias.

Chourio C., Angélica M.

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACIÓN DEL
CONCENTRADO DEL SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA DE
PEPSI-COLA VENEZUELA, PLANTA SAN PEDRO**

Tutor Académico: Prof. Rafael Martín. Tutor Industrial: Jerry Abache.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Año 2010, p.

**Palabras Claves: tratamiento de agua, ósmosis inversa, recuperación,
concentrado, permeado, agua de pozo.**

Resumen.

Se caracterizó y clasificó el agua de pozo y el agua de concentrado, determinándose que cumplen con los estándares de calidad establecidos en el decreto 3818 de aptas para agua potable, en el decreto 883 y la Norma Riverside para agua riego.

Para la recuperación y reutilización del agua de concentrado del sistema de ósmosis inversa, se analizaron tres alternativas: ALT 1 Reuso del agua de concentrado para agua de riego, ALT 2 Reuso del agua de concentrado para agua de servicios generales de la Planta y ALT 3 Reuso del agua de concentrado simultáneamente para agua de servicios generales de la Planta y para agua de riego, se compararon con base a los criterios maximización del uso del agua de concentrado (peso 40 %), de la calidad del agua (10 %) y confiabilidad operacional (30 %), y la minimización del tiempo de implementación (10 %) y del costo de inversión (10 %). Se utilizó el método de decisión múltiple binaria (MDMB) para la evaluación y selección de la alternativa más favorable obteniéndose puntuación de 35 ALT 1, 25 ALT 2 y 40 ALT 3. La solución de ingeniería más favorable para la recuperación del concentrado del sistema de ósmosis invertida, es la ALT 3.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
I.1.- Planteamiento del Problema	1
I.2.- Antecedentes	2
I.3.- Objetivos.....	4
I.3.1.- Objetivo general.....	4
I.3.2.- Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	5
II.1.- Tratamiento de agua por ósmosis inversa	5
II.1.1.- Fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa.....	5
II.1.2.- Sistema de ósmosis inversa para tratamiento de agua de pozo	6
II.1.3.- Pepsi- Cola Venezuela, C.A y su sistema de ósmosis inversa	8
II.1.3.1.- Características de la tecnología de membranas FILMTEC™ 8”BW30-400	10
II.1.3.2.- Desempeño hidráulico del sistema de ósmosis inversa	13
II.2.- Normas, criterios, métodos y técnicas a emplear.....	14
II.2.1.- Marco legal nacional de los recursos hídricos.....	14
II.2.1.1.- Criterios y requisitos para la clasificación de la calidad de agua para uso de riego y vertidos o efluentes líquidos.	14
II.2.1.2.- Criterios y requisitos para la clasificación de agua potable.	16
II.2.1.3.- Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego.	17

II.2.1.4.- Métodos y técnicas a emplear en la determinación de parámetros de calidad del agua.....	20
II.2.1.5.- Matriz de decisión múltiple binaria (MDMB).....	21
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	26
III.1.- Fase 1. Evaluación y validación de las condiciones de operación del sistema de ósmosis inversa.	27
III.2.- Fase 2. Caracterización del concentrado de ósmosis inversa.....	29
III.3.- Fase 3. Generación de alternativas para la recuperación del concentrado....	30
Estrategia.....	30
III.4.- Fase 4 Evaluación y selección de la solución más favorable para la recuperación del concentrado.....	32
III.5.- Fase 5. Definir los requerimientos de diseño de la solución seleccionada ..	33
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
IV.1.- Desempeño del sistema de ósmosis inversa.....	35
IV.1.1.- Calidad y clasificación del agua de pozo.....	35
IV.1.2.- Condiciones de operación del sistema de ósmosis inversa.....	38
IV.1.3.- Índice de eficiencia o de recuperación del sistema.	41
IV.2.- Calidad y clasificación del agua de concentrado	42
IV.2.1.- Índice de relación de absorción de sodio (RAS).....	46
IV.3.- Evaluación y selección de las alternativas de recuperación de agua de concentrado, usando el método de decisión múltiple binaria	47
IV.3.1.- Alternativas y criterios.....	48

IV.3.2.- Comparación y calificación de las alternativas en función de los criterios de decisión.	50
IV.4. Diseño de ingeniería conceptual y alcance de trabajos para la implementación de la solución de ingeniería más favorable.	51
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÉNDICE	63
APÉNDICE A. Ósmosis inversa de Planta San Pedro	63
APÉNDICE B. Cálculos analíticos de los análisis fisicoquímicos	64
APÉNDICE C. Balance iónico de los resultados analíticos	68
APÉNDICE D. Gráfico de consumo de agua de pozo para servicios generales medido a la salida del hidroneumático.	69
APÉNDICE E. Simulación con el DEMO Programa ROSA.....	70
APÉNDICE F. Descripción de alternativas propuestas.....	72
APÉNDICE G. Diagramas de flujo (DFP) de las alternativas de recuperación del concentrado.	76
APÉNDICE H. Aplicación del Método de decisión múltiple binaria (MDMB) para la evaluación de alternativas	80

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Membranas de ósmosis inversa seleccionada para el agua de pozo de Planta San Pedro.....	11
Tabla N° 2. Especificaciones de diseño de las membranas FILMTEC™ BW30-400	12
Tabla N° 3. Límites y rangos de las características de agua del sub-tipo 2A y 2B. ...	15
Tabla N° 4. Límites máximos de los parámetros físico-químicos de las aguas descargadas a redes cloacales.....	15
Tabla N° 5. Valor máximo y deseable de los componentes relativos a la calidad del agua potable.....	17
Tabla N° 6. Clasificación de las aguas según las normas Riverside.....	19
Tabla N° 7. Métodos y técnicas a emplear para la determinación de parámetros de calidad del agua de pozo y agua de concentrado.....	20
Tabla N° 8. Matriz de comparación de criterios por el (MDMB).	22
Tabla N° 9. Matriz de ponderación de cada criterio de decisión.....	23
Tabla N° 10. Matriz de puntuación de alternativa por criterio.	23
Tabla N° 11. Matriz de evaluación final	25
Tabla N° 12. Calidad del agua de pozo en periodo de sequía y lluvia.....	36
Tabla N° 13. Parámetros microbiológicos del agua de pozo	37
Tabla N° 14. Relación entre tiempo de operación y consumo de agua del sistema de ósmosis inversa.....	39
Tabla N° 15. Comparación de variables actual de operación con histórico 2008-2009 del sistema de ósmosis inversa, tecnología membranas BW30-400 FILMTEC™ ...	41
Tabla N° 16. Calidad del agua de concentrado del sistema de ósmosis inversa.	43

Tabla N° 17. Parámetros microbiológicos del concentrado.....	45
Tabla N° 18. Índice de absorción de sodio RAS y conductividad promedio de concentrado.	46
Tabla N° 19. Matriz de evaluación de criterios de decisión usando MDMB.....	49
Tabla N° 20. Matriz de evaluación final de alternativas usando MDMB.....	50
Tabla N° 21. Caracterización de la mezcla de agua de concentrado con agua de pozo	52
Tabla N° 22. Estructura de costo de inversión de la solución de ingeniería seleccionada	56

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Esquema del fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa.	6
Figura N° 2. Módulo en espiral de ósmosis inversa.	8
Figura N° 3. Sección transversal de módulo en espiral de ósmosis inversa	8
Figura N° 4. Diagrama esquemático de la utilización de agua de pozo.....	9
Figura N° 5. Elemento FILMTEC TM BW30-400 del sistema de ósmosis inversa instalado en Planta San Pedro.	11
Figura N° 6. Disposición de los recipientes a presión/elementos del sistema de membranas.	13
Figura N° 7. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S Soil Salinity Laboratory).....	18
Figura N° 8. Esquema de la metodología empleada.	26
Figura N° 9. Panel de control del sistema de ósmosis inversa	28
Figura N° 10. Medidor de flujo a la salida del hidroneumático	31
Figura N° 11. Calidad del agua de pozo y cumplimiento Decreto N° 3818 para agua potable.....	38
Figura N° 12. Calidad del concentrado de ósmosis inversa y cumplimiento Decreto N° 3818	44

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.

I.1.- Planteamiento del Problema

La tendencia mundial actual en los países industrializados y en los países en proceso de industrialización, es que los recursos naturales, en especial los no renovables, como el agua, se hacen cada día más escasos y costosos. Es por esto que el minimizar, reusar y reciclar el agua tiene cada vez más necesidad y urgencia, orientada hacia el cumplimiento de las políticas ambientales de clase mundial de cero desperdicios. Dentro de este contexto, Venezuela y por ende Pepsi-Cola Venezuela C.A, Planta San Pedro, no escapa de esta situación.

Desde el mes de abril del año 2008, Pepsi Cola Venezuela C.A., Planta San Pedro cuenta con un sistema de ósmosis inversa de membranas de tecnología FILMETC™ BW30-400, el cual opera actualmente con un caudal de agua alimentación proveniente de agua de pozo de 275,35 L/min (72,74 gpm), generando un caudal de permeado de 163,07 L/min (43,08 gpm) y un caudal de concentrado o rechazo de 112,27 L/min (29,66 gpm). El funcionamiento del mismo no es diariamente.

Estadísticas actuales de las variables de operación del sistema de ósmosis inversa, demuestran una producción promedio mensual de volumen permeado de 604.205 L y un volumen de concentrando de 418.541 L.

El permeado es utilizado principalmente para el lavado de las botellas de agua mineral y para la limpieza de las líneas y equipos involucrados en el proceso de envasado de agua mineral y eventualmente utilizado para la producción de bebidas carbonatadas. Mientras que, todo el volumen de concentrado generado en el sistema de ósmosis inversa es vertido directamente al sistema de red cloacal sin tratamiento previo.

Pepsi Cola-Venezuela C.A, Planta San Pedro, tiene actualmente la necesidad de ahorrar agua y mejorar el cumplimiento de la política ambiental a la tendencia del cero desperdicios.

Ante la problemática planteada, surge la necesidad de llevar a cabo este trabajo especial de grado, que consiste, fundamentalmente en realizar un estudio de factibilidad para la recuperación del concentrado o agua de rechazo que proviene del sistema de ósmosis inversa de Pepsi-Cola Venezuela C.A, Planta San Pedro para uso interno.

I.2.- Antecedentes

Los sistemas de tratamiento de agua con ósmosis inversa que se emplean en Empresas Polar, no cuentan con facilidades de recuperación o reutilización del concentrado o agua de rechazo, considerado como efluente y descargado a la red de desagüe.

Dentro de este contexto, no se cuenta con investigaciones previas realizadas en la Empresa Polar, relacionadas con proyectos de reutilización del agua de concentrado. Sin embargo, alrededor del mundo estos sistemas de ósmosis inversa se emplean como un tratamiento efectivo para la purificación y desalinización del agua, y debido a las condiciones en las que opera este tipo de sistema, se han realizado investigación para la recuperación, reutilización y/o tratamiento del concentrado o agua de rechazo. Entre algunas de estas investigaciones se pueden citar:

Badruzzaman (2009), presentó dos estrategias innovadoras para la reutilización del concentrado de ósmosis inversa (OI) producido por un sistema de membranas integrado de una planta de tratamiento de aguas de mar. Las tecnologías evaluadas en este estudio incluyeron la electrodialisis con membranas bipolares para la conversión de concentrado de OI en mezclas de ácidos y bases y la electrocloración para la generación de cloro. Los ácidos y bases, así como la producción de hipoclorito podrían aplicarse directamente al proceso de ósmosis inversa y a procesos de pre-tratamiento aguas arriba y una evaluación económica preliminar realizada en este estudio demostró que este enfoque de reutilización podría ser económicamente viable

para las instalaciones que utilizan sistemas de ósmosis inversa y tienen opciones limitadas para la eliminación de concentrado y poder conseguir cero descarga de líquido.

Jeppesen (2009), realizó un estudio que consistió en la extracción selectiva de algunos metales del concentrado de ósmosis inversa producido durante la desalinización de agua de mar que pudiesen traer beneficios ambientales y económicos, todo esto basado en acontecimientos recientes del desarrollo de sistemas de desalinización de cero descargas de líquido. Este estudio demostró que la recuperación de cloruro de sodio del concentrado de ósmosis inversa puede reducir considerablemente el costo de producción de agua potable en combinación con sistemas de tratamiento térmico. Además, la recuperación de metales como el Rubidio del agua de mar puede ser una fuente potencial de ingresos, sin embargo es necesario seguir trabajando para caracterizar la economía en el proceso de extracción de Rubidio.

I.3.- Objetivos

I.3.1.- Objetivo general

- Analizar la factibilidad de recuperación del concentrado o agua de rechazo proveniente del sistema de ósmosis inversa de Pepsi-Cola Venezuela C.A, para uso interno en la Planta San Pedro.

I.3.2.- Objetivos específicos

- Evaluar el funcionamiento del sistema de ósmosis inversa de tecnología de membranas BW30 400 FILMTEC TM.
- Conocer la caracterización físico-química, organoléptica y microbiológica del concentrado o agua de rechazo del sistema de ósmosis inversa.
- Generar alternativas para la recuperación del concentrado del sistema de ósmosis inversa.
- Evaluar y seleccionar la alternativa de solución de ingeniería más favorable para la recuperación del concentrado.
- Definir los requerimientos de diseño de la solución seleccionada para la recuperación del concentrado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1.- Tratamiento de agua por ósmosis inversa

En este capítulo, se presentan las bases teóricas del fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa como tratamiento de agua, la descripción y especificación del sistema instalado en Pepsi-Cola Venezuela C.A, Planta San Pedro y finalmente las características y desempeño hidráulico de la tecnología de membranas FILMTEC™ BW30-400.

II.1.1.- Fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa

La ósmosis es el proceso que tiene lugar cuando una membrana, con permeabilidad selectiva al agua, separa dos soluciones salinas acuosas de distinta concentración, que se encuentran a la misma presión y temperatura. De forma natural el agua pasa de la solución más diluida a la más concentrada a través de las membranas. El fenómeno cesa cuando el aumento de presión hidrostática, en el lado de la membrana de la solución más concentrada, supone una resistencia suficiente para impedir el paso del agua proveniente de la solución diluida.

La diferencia de presión entre las dos soluciones cuando se alcanza este estado de equilibrio se denomina diferencia de presión osmótica transmembrana. Si lo que se pretende es invertir el flujo de agua generado por la ósmosis es necesario aplicar, en el lado de la solución concentrada, una presión que origine una diferencia de presión transmembrana superior a la presión osmótica. De esta forma se logra que el flujo de agua sea en el sentido de la solución concentrada a la solución diluida, obteniéndose un permeado o agua de producto de calidad suficiente para ser utilizada en el consumo humano o en otras aplicaciones. (Rodríguez, 2006)

En la Figura N° 1 se muestra un esquema del fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa

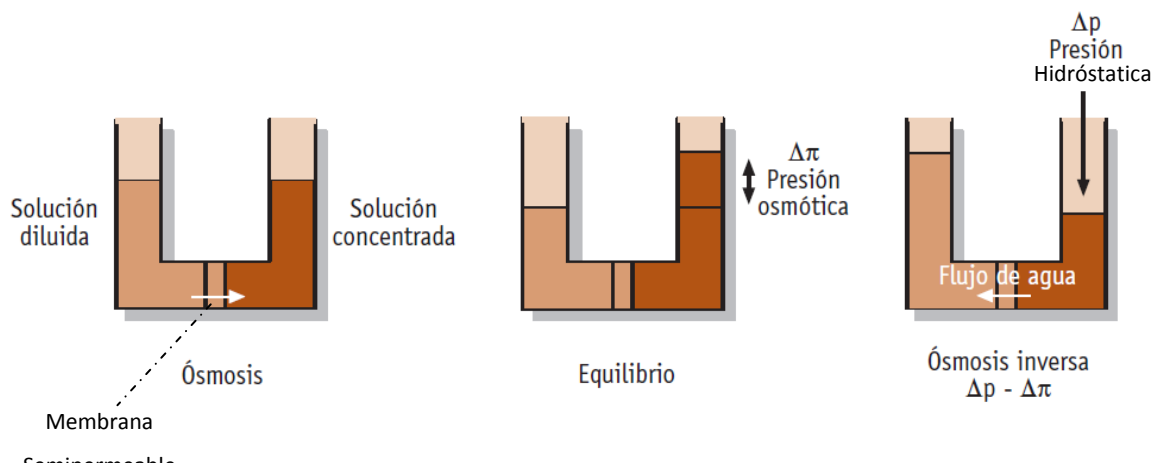


Figura N° 1. Esquema del fenómeno de ósmosis y ósmosis inversa.

Fuente: Rodríguez, A (2006)

II.1.2.- Sistema de ósmosis inversa para tratamiento de agua de pozo

Los sistemas de ósmosis inversas garantizan el tratamiento desalinizador físico, químico y bacteriológico del agua. Pueden ser tratadas con ósmosis inversa aguas con un elevado contenido de sales como, sodio, calcio, boro, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos, hasta alcanzar los límites considerados como agua aceptable para su utilización.

Funciona mediante membranas filtrantes las cuales son las responsable de separar las sales del agua, dichas membranas pueden considerarse como filtros moleculares. El tamaño de los poros de estos filtros son extremadamente reducidos, por lo que se requiere una presión considerable para hacer pasar cantidades de agua a través de ellas. Los contaminantes que quedan en las membranas son posteriormente arrastrados y lavados por la misma corriente de agua y por limpieza química. De esta forma el sistema realiza un auto limpieza constante. Del sistema de ósmosis inversa se generan simultáneamente dos corrientes, una de permeado o agua de producto que es la que atraviesa la membrana siendo agua de alta pureza con bajo contenido de sólidos disueltos y de microorganismos, y la otra corriente de concentrado o rechazo

que no pasa por la membrana pero corre del otro lado, limpiando el agua continuamente y trayendo los sólidos inorgánicos y orgánicos para drenarlos. (“ósmosis inversa”, 2001)

Los componentes básicos de una instalación de ósmosis inversa consiste en la fuente de agua de alimentación, un sistema de pre-tratamiento que permite eliminar los sólidos en suspensión presentes en el agua que podrían dañar a las membranas, una bomba de alta presión que suministra de forma continua el fluido a tratar y es la encargada de suministrar la presión necesaria para producir el proceso y los elementos de membranas de ósmosis inversa, que pueden ser de tres configuraciones: elemento tubular, elemento espiral y elemento de fibras huecas. (U.S Environmental protection agency, EPA, 2002)

Los elementos en espiral están constituidos por membranas planas que se enrollan en espiral en torno a un tubo central, por el cual discurre el permeado, como se muestra en la Figura N° 2. El elemento se forma a partir de una lámina rectangular de membrana semipermeable que se dobla por la mitad, de tal forma que la capa activa quede en su exterior. En el interior de las dos mitades se coloca un espaciador que permite que el permeado de la membrana circule y se colecte en el tubo central, como se representa en la Figura N° 3.

Sobre la capa activa de la membrana va una malla que tiene canales de distribución, con el fin de repartir uniformemente sobre la membrana el flujo de alimentación a tratar. (García, 2007)

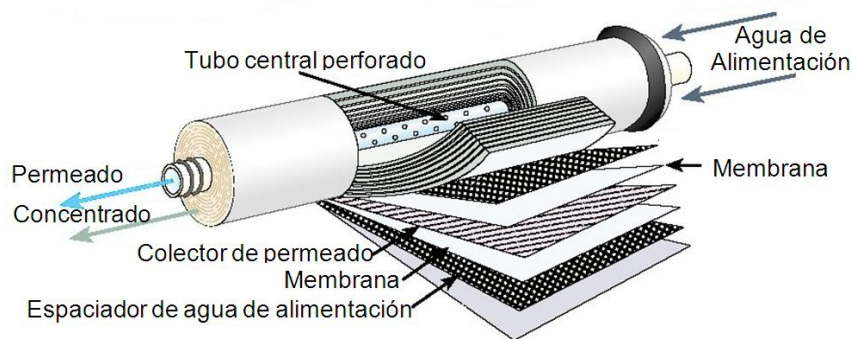


Figura N° 2. Módulo en espiral de ósmosis inversa.

Fuente: Li, N. y Fane, A (2008)

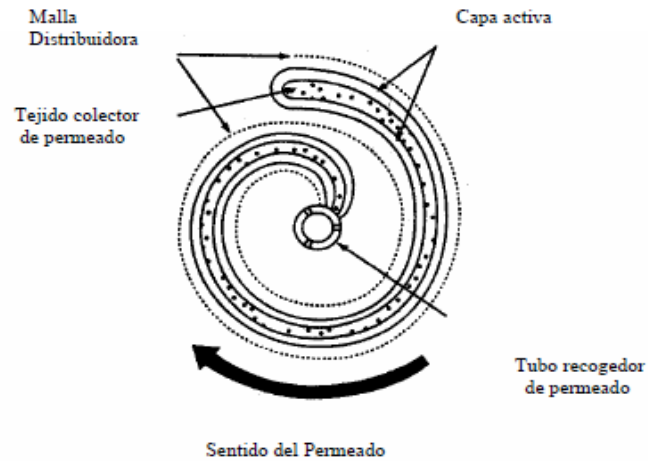


Figura N° 3. Sección transversal de módulo en espiral de ósmosis inversa

Fuente: García, C (2007)

II.1.3.- Pepsi- Cola Venezuela, C.A y su sistema de ósmosis inversa

Pepsi-Cola Venezuela, C.A-Planta San Pedro está ubicada en San Pedro de Los Altos, Estado Miranda, en la cual se lleva a cabo el envasado del producto agua mineral “Minalba”.

El agua utilizada para la operación del proceso de envasado en la Planta San Pedro, proviene de dos fuentes. Una, agua de manantiales, la cual recibe únicamente

tratamiento físico compuesto por filtros de manga, filtros de carbón activado, filtros de cartucho y lámparas ultravioletas para su envasado como producto “Minalba” y otra, agua proveniente de pozo.

El agua de pozo, actualmente, es empleada como agua de alimentación a ser tratada en el sistema de ósmosis, como agua de servicios generales de la planta para uso de baños, cocina y limpieza general, y como agua para riego de áreas verdes, como se representa en la Figura N° 4. Diagrama esquemático de utilización de agua de pozo.

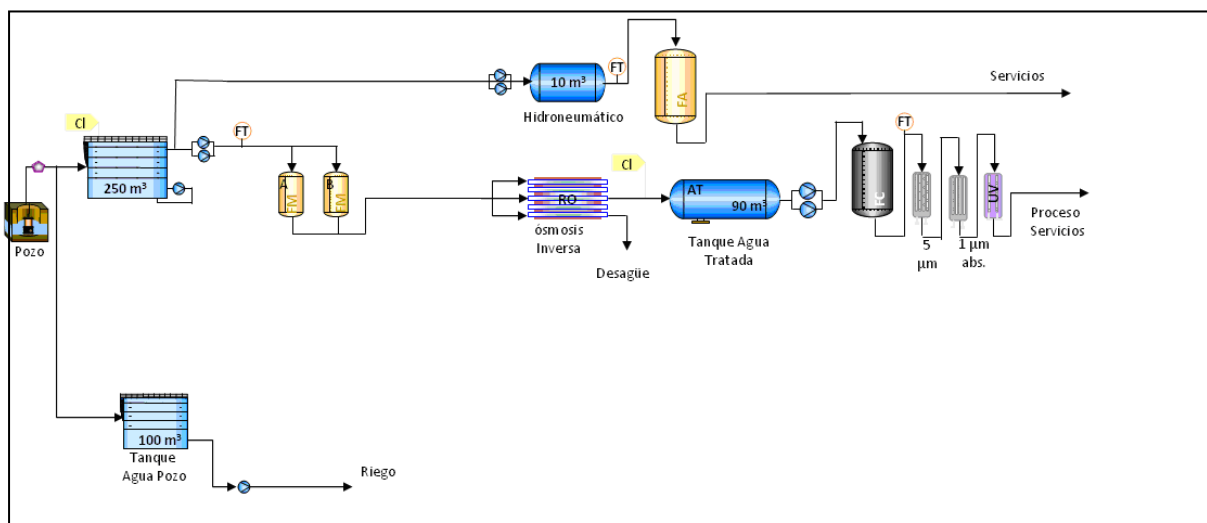


Figura N° 4. Diagrama esquemático de la utilización de agua de pozo.

Fuente: Diagramas esquemáticos de Pepsi-Cola C.A Venezuela, Planta San Pedro.

El agua de pozo, utilizada como agua de alimentación al sistema de ósmosis, es almacenada en un tanque de 250 m³, seguidamente recibe un pre-tratamiento pasando por dos filtros multimedia que permiten eliminar sólidos en suspensión.

Una vez que el agua es pasada a través de estos filtros, entra a la unidad de ósmosis inversa, donde se le dosifica continuamente anti-escalante al 5% y bisulfito de sodio al 10%. El anti-escalante está formulado con una combinación de fosfatos orgánicos y dispersantes poliméricos, los cuales inhiben la incrustación en las membranas, formando esterres en forma de escamas los cuales salen del sistema en la corriente del

agua de concentrado. Mientras que el bisulfito de sodio se emplea como agente reductor para la eliminación del cloro del agua de alimentación, ya que éste es extremadamente agresivo en las membranas de ósmosis inversa. (Juby, G. 2008)

Luego el agua, es tratada por el sistema de ósmosis inversa de membranas de tecnología FILMTEC™ 8”BW30-400, donde se producen agua de permeado y agua de concentrado.

El agua de permeado es empleada para los procesos de esterilización de las líneas de producción de agua Minalba y en el lavado de botellas de agua, mientras que el agua de concentrado es vertida a la red de desagüe.

II.1.3.1.- Características de la tecnología de membranas FILMTEC™ 8”BW30-400

Pepsi-Cola Venezuela, C.A-Planta San Pedro, seleccionó la tecnología de membranas FILMTEC™ 8”BW30-400, de The Dow Chemical Company para el sistema de ósmosis inversa en el tratamiento de agua de pozo.

Las membranas FILMTEC™ 8”BW30-400 son poliamidas enrolladas en espiral. Las características y límites máximos de operación son mostrados en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Membranas de ósmosis inversa seleccionada para el agua de pozo de Planta San Pedro

Etapa	Recipiente/Elementos	Fabricante de membranas	Nombre del producto	Área activa (m ²)
1	2/6	Dow FILMTEC™	BW30-400	37
2	1/3	Dow FILTEC™	BW30-400	37

Fuente: Installation and service manual, (2007)

En la Figura N° 5, se muestra el elemento individual BW30-400 de membranas FILMTEC™, el cual tiene una recuperación unitaria de caudal de producto o permeado a caudal de alimentación del 15 %, siendo sus dimensiones las siguientes: A: 40" (1,016), B: 1,125" (29) y C: 7,9" (201).

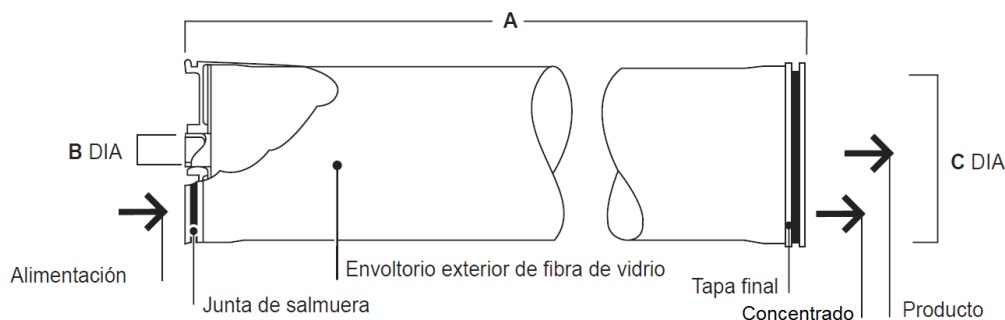


Figura N° 5. Elemento FILMTEC™ BW30-400 del sistema de ósmosis inversa instalado en Planta San Pedro.

Fuente: FILMTEC™ BW30-400, (1999)

En la siguiente Tabla N° 2 se muestra las características y límites máximos de operación para las membranas FILMTEC™ BW30-400

Tabla N° 2. Especificaciones de diseño de las membranas FILMTEC™ BW30-400

Características y límites máximos de operación	
Tipo de membrana	Compuesto de capa delgada
Presión de operación	600 psi (4,1 MPa)
Temperatura de operación	113 °F (45°C)
Tolerancia al cloro libre	≤0,1 ppm
Rango de pH, operación continua	2-11
Rango de pH, limpieza a corto plazo (30 min)	1-12
Caudal de alimentación	85 gpm (19,1 m3/h)
Caudal de permeado	65,61 gpm (14,9 m3/h)
Caudal de concentrado	19,39 gpm (4,2 m3/h)
Porcentaje de recuperación	77%
Máximo índice de atascamiento S.D.I a la entrada	5
Rechazo de sal	99,5%

Fuente: FILMTEC™ BW30-400, (1999)

II.1.3.2.- Desempeño hidráulico del sistema de ósmosis inversa

El sistema de ósmosis inversa de la Planta San Pedro, está constituido por dos etapas con tres recipientes a presión que contiene 3 elementos cada uno, colocados en un arreglo de matriz de 2:1, como se representa en la Figura N° 6.

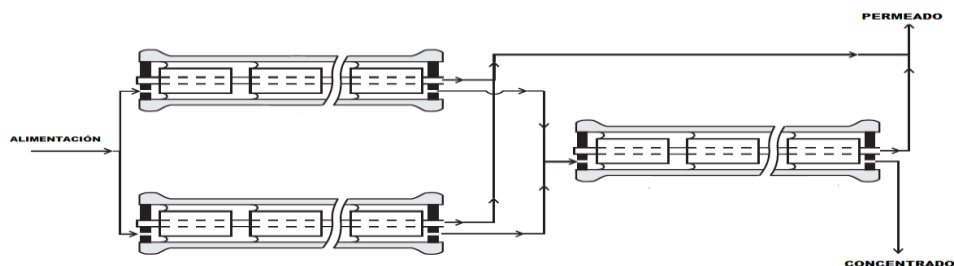


Figura N° 6. Disposición de los recipientes a presión/elementos del sistema de membranas.

Fuente: System operating characteristics FILMTEC Membranes. (2004)

Los sistemas de dos etapas, son capaces de funcionar con un porcentaje de recuperación de permeado en un rango entre 55 a 75%, con un porcentaje promedio de recuperación por elemento que puede variar desde 7 hasta 12%. Sin embargo el elemento FILMTEC™ BW30-400 seleccionado para el sistema de ósmosis inversa de la Planta San Pedro, presenta una alta productividad, debido al aumento en el área activa de las membranas y aun incremento del porcentaje de recuperación por elemento del 15% para alcanzar un porcentaje promedio de recuperación de caudal permeado a caudal de alimentación de igual o mayor del 70%.

Si el sistema opera por debajo del 70%, el caudal de flujo de alimentación a los vasos de la primera etapa puede ser demasiado alto, resultando una alimentación excesiva ocasionando un potencial daño a los elementos. Este desempeño, puede ser simulado por el software ROSA: Reverse Osmosis System Analysis, elaborado por The Dow Chemical Company. (“System operating characteristics FILMTEC Membranes”, 2004)

II.2.- Normas, criterios, métodos y técnicas a emplear.

A continuación, se muestran las normas, criterios, métodos y técnicas a emplear para el análisis y comparación de los resultados durante la realización de la investigación de campo.

II.2.1.- Marco legal nacional de los recursos hídricos.

En Venezuela, se tiene una serie de leyes, y normativas que rigen la calidad del agua dependiendo del destino que se le dé. Entre ellas se encuentra la norma para la clasificación y control de calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos estipulada por el decreto N° 883 y las normas sanitarias de calidad del agua potable decreto N° 3.818.

II.2.1.1.- Criterios y requisitos para la clasificación de la calidad de agua para uso de riego y vertidos o efluentes líquidos.

El decreto N° 883 establece las exigencias o requisitos para el control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos.

Las aguas destinadas a usos agropecuarios, se denominan aguas de Tipo 2. Estas aguas se desagregan en los siguientes sub-tipos:

Sub Tipo 2A: Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.

Sub Tipo 2B: Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.

Los límites y rangos que corresponden a las características de agua del Sub-tipo 2A y 2B se muestran en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Límites y rangos de las características de agua del sub-tipo 2A y 2B.

Parámetro	Límite o Rango del sub-tipo 2A	Límite o Rango del sub-tipo 2B
Organismos Coliformes totales	Promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 mL	Promedio mensual menor a 5000 NMP por cada 100 mL
Organismos Coliformes fecales	Promedio mensual menor a 100 NMP por cada 100 mL	Promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 mL
Hierro total	1,0 mg/L	1,0 mg/L
Sólidos disueltos	3000 mg/L	3000 mg/L
totales		
Sólidos flotantes	400 mg/L	400 mg/L

Fuente: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos Decreto N° 883 , (1995)

Las aguas que se destinan a la descarga a redes cloacales debe cumplir ciertos parámetros de calidad. Los parámetros de calidad de los vertidos líquidos que vayan a ser descargados a redes cloacales no deberán ser mayores a los rangos y límites establecidos en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4. Límites máximos de los parámetros físico-químicos de las aguas descargadas a redes cloacales.

Parámetros Físico-químicos	Límites máximos o rangos
Hierro total	25 mg/L
Manganeso total	10,0 mg/L
Mercurio total	0,01 mg/L
pH	6 – 9

Parámetros Físico-químicos	Límites máximos o rangos
Plomo total	0,5 mg/L
Sólidos flotantes	Ausentes
Sólidos suspendidos	400 mg/L
Sólidos totales	1600 mg/L
Sulfatos	400 mg/L
Sulfuros	0,5 mg/L
Temperatura	40°C

Fuente: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos Decreto N° 883 , (1995)

II.2.1.2.- Criterios y requisitos para la clasificación de agua potable.

Las normas sanitarias de la calidad del agua potable, decreto N° 3818, Gaceta Oficial N° 36.395, establecen los valores máximos de los componentes o características del agua que representa un riesgo para la salud.

En relación a las características microbiológicas del agua, se establece en esta normativa que los resultados de los análisis bacteriológicos del agua potable deben cumplir los siguientes requisitos:

- Ninguna muestra de 100 mL, deberá indicar la presencia de organismos coliformes Termorresistente (coliformes fecales).
- El 95 % de las muestras de 100 mL, analizadas en la red de distribución no deberán indicar la presencia de organismos coliformes totales durante cualquier período de 12 meses consecutivos.
- En ningún caso, deberá detectarse organismos coliformes totales en dos muestras consecutivas de 100 mL, provenientes del mismo sitio.

El agua potable deberá cumplir con los requisitos organolépticos, físico-químicos presentados en la Tabla N° 5.

Tabla N° 5. Valor máximo y deseable de los componentes relativos a la calidad del agua potable

Componente o característica	Unidad	Valor deseable menor a	Valor Máximo Aceptable
Color	UCV(b)	5	15(25)
Olor o sabor		Aceptable para la mayoría de los consumidores	
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	600	1000
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	250	500
pH		6,5-8,5	9,0
Cloruro	mg/L	250	300
Hierro Total	mg/L	0,1	0,3(1,0)
Sulfato	mg/L	250	500
Alcalinidad total	mg/L	250	500
Fosfato	mg/L	0,5	0,5
Magnesio	mg/L	30	30
Calcio	mg/L	200	200

- (a) Los valores entre paréntesis son aceptados provisionalmente en casos excepcionales, plenamente justificados ante la Autoridad Sanitaria.
- (b) UCV: Unidades de Color Verdadero.
- (c) UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

Fuente: Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. Decreto N° 3.818, (1998)

II.2.1.3.- Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego.

Para la evaluación del agua destinada a riego se empleará las normas como la Riverside que permiten determinar la calidad de agua destinada para tal fin.

Las normas de Riverside toman en consideración la conductividad y el índice de la relación de absorción de sodio (RAS) que se refiere a la proporción relativa que se encuentran sodios e iones calcio y magnesio de acción sobre el suelo.

La ecuación para el RAS viene dada por lo siguiente:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\left(\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2} \right)^{1/2}} \quad (Ec.1)$$

A partir de los datos de conductividad (micromhos/cm) y el RAS se emplea la Figura N° 7 para clasificar el agua.

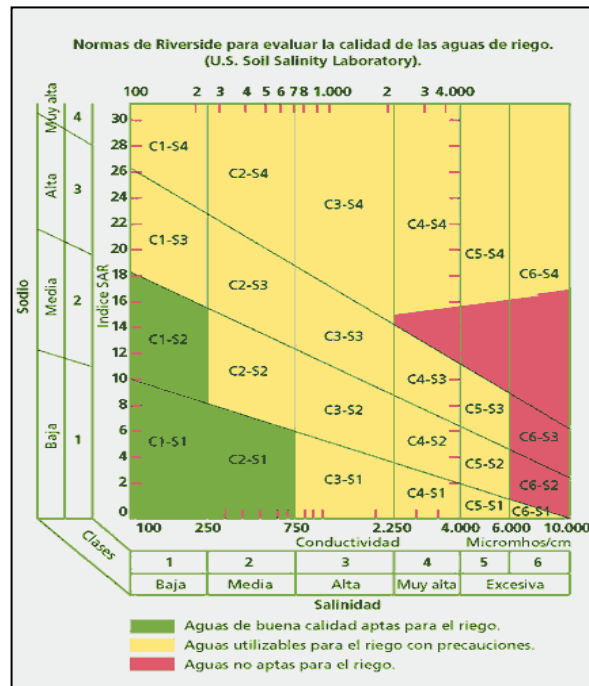


Figura N° 7. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego
(U.S. Soil Salinity Laboratory).

Fuente: Diagnóstico de agua, (2004)

Una vez obtenidos los resultados, se procede a identificar la calidad del agua analizada con los criterios empleados en la clasificación de las aguas de la normas Riverside mostrada en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6. Clasificación de las aguas según las normas Riverside.

Tipo	Calidad y normas de uso
C1	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad
C2	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad
C3	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad
C4	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Solo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad
C5	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente
C6	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para el riego
S1	Agua con bajo contenido de sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio
S2	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S3	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes altos de riego
S4	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

Fuente: Sydney Environmental & Soil Laboratory, (2004)

II.2.1.4.- Métodos y técnicas a emplear en la determinación de parámetros de calidad del agua.

Entre los métodos y técnicas analíticas que se emplearán para la determinación de los parámetros fisicoquímicos, organolépticos y microbiológicos serán los especificados en las Normas COVENIN.

En la Tabla N° 7, se muestra las normativas COVENIN que corresponden a los métodos y técnicas para la determinación de los parámetros de calidad del agua.

Tabla N° 7. Métodos y técnicas a emplear para la determinación de parámetros de calidad del agua de pozo y agua de concentrado.

Parámetro de calidad	Norma Venezolana COVENIN
Alcalinidad	2188-84: Agua potable. Determinación de alcalinidad. Titulación con ácido sulfúrico 0,02N
Calcio, dureza total, magnesio	2408-86: Agua. Determinación Dureza total, calcio, método volumétrico. Determinación de magnesio por cálculo. Titulación con EDTA
Cloruro	2138-84 Agua. Determinación de cloruros. Titulación con Nitrato de Plata. Método de Mohr
Fosfato	2304-85. Agua Potable. Determinación de fosfato.
Hierro	2120-84: Agua. Determinación de hierro. Método de la fenantrolina.
Sólidos totales disueltos	2342-86: Agua potable. Determinación del residuo filtrable total secado a 180°C (sólidos disueltos).
Coliformes	3047-93: Agua potable. Método de determinación del número más probable de bacterias coliformes.
Pseudomonas	2986-93: Agua potable. Determinación de pseudomonas aeruginosa por el

método del número más probable.

Esterococos

2522-88: Alimentos recuento de enterococos.

Mesófilos

902-87: Alimentos. Método para recuento de colonias de bacterias aerobias en placa.

Parámetros organolépticos:
color, olor y sabor

Procedimientos de Pepsi-Cola Venezuela para la determinación de color, olor y sabor en el agua potable

II.2.1.5.- Matriz de decisión múltiple binaria (MDMB)

La matriz de decisión múltiple binaria es una herramienta para ser utilizada en la evaluación y selección de alternativas. El método reduce la emisión de juicios de tipo subjetivos puesto que consiste de un proceso de evaluación donde los parámetros son comparados entre sí. (De Souza, 1997)

El MDMB se utiliza para asignar los factores de peso o ponderación a los diferentes criterios o variables de decisión que comprende una matriz de evaluación así como también, se usa para seleccionar, entre diferentes alternativas propuestas, la más favorable de acuerdo a una puntuación obtenida a través del método.

El método consiste en lo siguiente:

1. Seleccionar los criterios que interesan para las alternativas propuestas.
2. Asignar un peso a cada criterio de decisión. El método a seguir consiste en comparar cada criterio con los demás, con base de uno a uno, es decir, si entre los criterios A y B, el que tiene más peso es B comparado con A, a este criterio se le asigna el “1” mientras que a A se le asignará el “0”. Así se procede comparando a A con C y A con D, y luego B con C y B con D y de esta manera todos los criterios. Los resultados serán presentados en una matriz como se indica en la Tabla N° 8.

Tabla N° 8. Matriz de comparación de criterios por el (MDMB).

	A	B	C	D
A	-	0	1	1
B	0	-	1	0
C	0	0	-	1
D	1	1	0	-

3. Una vez hecha la comparación en pareja de los criterios y haber obtenido los "unos y "ceros" resultantes, se procede a obtener los factores de peso o ponderación para cada criterio de decisión de la matriz. Para ello se aplica la Ecuación 2

$$\text{Peso} = (\text{SP}/\text{ST}) \times 100 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

SP: suma de los puntos obtenidos para un determinado criterio. En la matriz es la suma de los "unos" de una línea en cuestión.

ST: suma de la totalidad de los puntos. En la matriz, éste número debe coincidir con la cantidad de "unos".

La Tabla N° 8 se complementa con la Tabla N° 9 para ilustrar la distribución de los pesos.

Tabla N° 9. Matriz de ponderación de cada criterio de decisión.

	A	B	C	D	SP	Peso
A	-	0	1	1	2	33,33%
B	0	-	1	0	1	16,6%
C	0	0	-	1	1	16,6%
D	1	1	0	-	2	33,3%
				ST	6	

4. Una vez obtenidos los factores de peso que se disponen para los criterios de la matriz, se evalúan las alternativas entre sí para cada criterio. Suponiendo que se tiene tres alternativas propuestas, 1, 2 y 3. Para obtener la alternativa más favorable se procede a compararlas y a calificarlas. Así pues, para el criterio A se comparan las alternativas 1 y 2, la que dentro de éste criterio sea la más favorable obtiene un "1". Las comparaciones se miden por su carácter objetivo. Se sigue comparando la alternativa 1 con la 2, la 2 con la 3 y así sucesivamente.

El procedimiento se repite para los otros criterios y se va obteniendo una puntuación calculada por la Ecuación 1 de alternativas en función de un criterio. En la Tabla N°10 se muestra dicha matriz.

Tabla N° 10. Matriz de puntuación de alternativa por criterio.

Criterio A	ALT 1	ALT2	ALT3	SP	Peso (%)
	2	3			
ALT 1	-	0	1	1	33,3
ALT 2	1	-	1	2	66,7
ALT 3	0	0	-	0	0,0
			ST	6	
Criterio B	ALT 1	ALT2	ALT3	SP	Peso (%)
	2	3			

ALT 1	-	0	1	1	33,33
ALT 2	1	-	1	2	66,7
ALT 3	0	0	-	0	0,0
	ST				3
Criterio C	ALT 1	ALT2	ALT3	SP	Peso (%)
ALT 1	-	0	1	1	66,7
ALT 2	1	-	1	2	0,0
ALT 3	0	0	-	0	33,3
	ST				3
Criterio D	ALT 1	ALT2	ALT3	SP	Peso (%)
	2	3			
ALT 1	-	0	1	1	66,7
ALT 2	1	-	1	2	0,0
ALT 3	0	0	-	0	33,3
	ST				3

5. Siguiendo los pasos delineados se obtiene la puntuación parcial por alternativa para cada criterio. Seguidamente se pondera la puntuación obtenida por el peso que tiene cada criterio dentro de la matriz de evaluación.
- Por ejemplo, para la alternativa 1, el criterio A vale 33.3%, por lo tanto, en la matriz esta alternativa obtiene una puntuación de 11,1 puntos obtenida mediante la Ecuación 3.

$$\text{Puntuación} = (\text{PA}/100) * \text{PP} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

PA= Peso de la alternativa i en función del criterio.

PP= Peso del criterio

$$(33.3/100) \times 33.3 = 11,1 \text{ puntos}$$

Esta puntuación se tabula y se suma para así obtener la puntuación de cada alternativa. La alternativa que obtenga más puntos será la más recomendable. En la Tabla N° 11 se muestra un ejemplo de como quedará la matriz de evaluación final.

Tabla N° 11. Matriz de evaluación final

Criterios	Peso (%)	ALT 1(%)	ALT 2(%)	ALT 3(%)
Criterio A	33,3	11,1	22,2	0
Criterio B	16,6	5,5	11,1	0
Criterio C	16,6	11,1	0	5,5
Criterio D	33,3	22,2	0	11,1
Puntuación	100,0	49,9	33,3	16,6

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El capítulo referido al marco metodológico, representa la metodología de investigación de campo a seguir como un conjunto ordenado de fases y procedimientos que permitió obtener, clasificar, comprender, organizar y analizar los datos e información que permitió alcanzar el objetivo general, definido en la sección I.3.1, capítulo I.

La metodología de investigación de campo que se empleó para llevar a cabo este trabajo especial de grado, estuvo conformada de cinco (5) fases, las cuales se muestran en la Figura N° 8. Cada fase se abordó, considerando la estrategia, las actividades realizadas y el producto esperado de la fase.

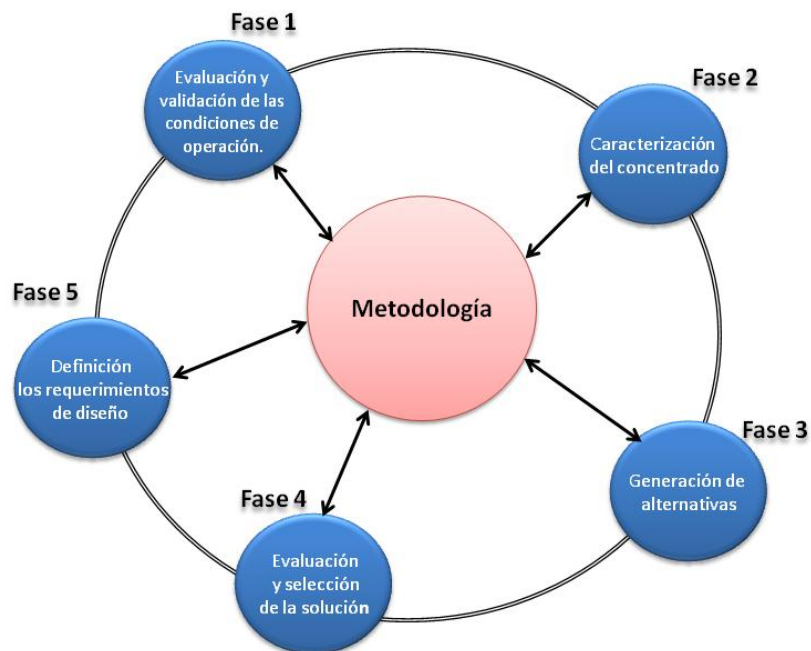


Figura N° 8. Esquema de la metodología empleada.

III.1.- Fase 1. Evaluación y validación de las condiciones de operación del sistema de ósmosis inversa.

Estrategia

Esta fase contempló la evaluación de las condiciones de operación del sistema de ósmosis inversa, con el fin de validar su funcionamiento en cuanto a cantidad de agua de alimentación al sistema, cantidad de agua de concentrado que es desperdiciada, frecuencia de operación del sistema actual y la eficiencia del sistema de ósmosis de tecnología de membranas BW30-400 FILMTEC TM.

Actividades

Las actividades que se realizaron fueron:

1. Inducción técnica sobre el sistema de ósmosis inversa de la planta. La inducción fue dictada por personal de la Gerencia Técnica de la Planta y de la Gerencia de Proyectos de la Empresa Polar.

2. Consulta del manual de servicio e instalación del sistema de ósmosis inversa y recorrido a Planta. Se revisó el manual y se realizó recorrido por planta para conocer y comprender el proceso tratamiento de ósmosis inversa, las variables de operación y de diseño, y el arranque, funcionamiento y parada del sistema

3. Caracterización y clasificación del agua de alimentación (agua de pozo).

Se tomó una muestra mensual, considerando los periodos de sequía y de lluvia, de agua de pozo, a la entrada de tanque de suministro al sistema. Se recogió un volumen de muestra de dos (2) litros. Se utilizó el laboratorio central de Pepsi Cola, Planta de San Pedro para realizar los análisis. La medición de estos parámetros fisicoquímicos, organolépticos y microbiológicos, se llevaron acabo de acuerdo a los métodos y técnicas especificados en las Tabla N° 7, sección II.2.1.4 de este documento. Se compararon estos resultados con las exigencias del Decreto N° 3818.

4. Recopilación y registro de las variables de operación del sistema de ósmosis inversa. Se monitoreó por un periodo de ocho (8) meses, desde noviembre 2009 hasta junio 2010, las mediciones de las lecturas de las variables de operación en el panel de control del sistema y se registraron los datos observados. Se mantuvo un registro con los días de la semana y el tiempo que se mantuvo operando el sistema de ósmosis, así como de las variables de operación: caudal de agua de alimentación, caudal de permeado, caudal de concentrado, caudal de recirculación, temperatura y presión a la entrada de las membranas. En la Figura N° 9 se muestra el panel de control del sistema, donde fueron monitoreadas dichas variables.

Se recopiló datos históricos de las condiciones de operación del sistema, desde abril 2008, inicio de operación de sistema hasta octubre 2009. Se utilizó DEMO del software ROSA, Reverse Osmosis System Analysis, elaborado por The Dow Chemical Company, para hacer corridas de simulación del desempeño hidráulico del funcionamiento del sistema.



Figura N° 9. Panel de control del sistema de ósmosis inversa

5. Análisis de los datos de las variables de operación.

Se analizaron los datos y se compararon respecto a los datos de las variables de diseño del sistema y con los datos históricos, con el fin evaluar el funcionamiento del sistema actual de ósmosis inversa.

Producto de esta fase

Información de la caracterización del agua de pozo. Comparación de la calidad del agua respecto al Decreto N° 3818. Definición y comparación de las variables de operación actual con valores históricos y las variables de diseño del sistema. Desempeño del sistema actual.

III.2.- Fase 2. Caracterización del concentrado de ósmosis inversa.

Estrategia

Esta fase consistió en conocer y determinar la calidad y clasificación del agua de concentrado producido del sistema de ósmosis inversa.

Actividades

Las actividades que se realizaron fueron:

1. Toma de muestras para ser analizadas en el laboratorio. Se tomó una muestra mensual, considerando los periodos de sequía y de lluvia del agua de concentrado, a la salida del sistema de ósmosis inversa. Se considero, que las condiciones de operación del sistema estuviesen constantes para el momento de la toma de las muestras. Se recogió un volumen de muestra de dos (2) litros.

2. Realización de análisis en el laboratorio para la determinación de los parámetros físico-químicos, organolépticos y microbiológicos. Se utilizó el laboratorio central de Pepsi Cola, Planta de San Pedro y laboratorio especializado externo. La medición de estos parámetros fisicoquímicos, organolépticos y microbiológicos, se llevó acabo de acuerdo a los métodos y técnicas especificados en las Tabla N° 7, sección II.2.1.4 de este documento. Los parámetros físico-químicos

medidos fueron: alcalinidad, calcio, cloruros, dureza total, fosfato, hierro, magnesio, pH, sólidos totales disueltos, sulfatos, bicarbonatos, sodio, y conductividad eléctrica. Los parámetros organolépticos medidos fueron: color, olor y sabor. Los parámetros microbiológicos medidos fueron: mesófilos, coliformes fecal y total, pseudomonas y enterococos.

3. Cálculo del índice de relación de absorción de sodio (RAS). Se calculó utilizando los valores de concentración de los cationes sodio, calcio y magnesio, y el método de cálculo de la Ecuación 1.

4. Clasificación de la calidad del agua de concentrado. Se graficó y analizaron los datos de los resultados obtenidos de los análisis en el laboratorio y de los resultados determinados del índice RAS. Se compararon los valores respecto a la conformidad con los criterios y requisitos establecidos en el Decreto N° 3818 para clasificar la calidad del agua para uso potable, y con la Norma de “Riverside” para clasificar la calidad del agua de concentrado para uso de riego.

Producto obtenido de la fase

Información de la caracterización del agua de concentrado. Comparación de la calidad del agua respecto al Decreto N° 3818 y a la Norma Riverside. Definición de posibles usos.

III.3.- Fase 3. Generación de alternativas para la recuperación del concentrado

Estrategia

Esta fase consistió, en establecer diferentes alternativas de solución de ingeniería para la recuperación del concentrado del sistema de ósmosis inversa para darle uso interno en la Planta San Pedro.

Actividades

Las actividades que se realizaron fueron:

1. Determinación del consumo de agua de pozo que se utiliza para servicios generales y para riego. Se mantuvo un registro semanal del consumo de agua de pozo que se emplea para agua de servicios generales de la planta y para riego. Se contabilizó el consumo de agua para riego y el agua para servicios generales a través del medidor de flujo instalado a la salida del hidroneumático de la Planta San Pedro. En la Figura N° 10 se muestra dicho medidor. Los registros fueron tomados semanalmente.



Figura N° 10. Medidor de flujo a la salida del hidroneumático

2. Identificación y definición de las alternativas viables de recuperación del concentrado. Se identificó y definió tres (3) alternativas viables. Se presentó para concertación y aprobación a la gerencia técnica, gerencia de aseguramiento de la calidad de la Planta de Pepsi Cola, San Pedro y a la gerencia de proyectos de la Empresa Polar - Los Cortijos. Las alternativas aprobadas fueron:

- Alternativa 1 (ALT 1). Reuso del agua de concentrado para agua de riego
- Alternativa 2 (ALT 2). Reuso del agua de concentrado para agua de servicios generales de la Planta.

- Alternativa 3 (ALT 3). Reuso del agua de concentrado simultáneamente para agua de servicios generales de la Planta y para agua de riego.

Producto obtenido de la fase

Alternativas propuestas, documentadas y aprobadas.

III.4.- Fase 4 Evaluación y selección de la solución más favorable para la recuperación del concentrado**Estrategia**

Esta fase consistió, en la evaluación y selección de la solución de ingeniería más favorable para la recuperación del concentrado.

Actividades

Las actividades que se realizaron fueron:

1. Definición de los criterios o variables de decisión para seleccionar la alternativa de recuperación de concentrado. Se identificó y definió cinco (5) criterios de decisión. Se presentó para concertación y aprobación de la gerencia técnica, gerencia de aseguramiento de la calidad de la Planta de Pepsi Cola, San Pedro y de la gerencia de proyectos de la Empresa Polar - Los Cortijos. Los criterios de decisión aprobados fueron:

- Criterio A: Maximización uso del agua de concentrado.
- Criterio B: Maximización calidad del agua. (conformidad con Decretos N° 3818, 883 y Norma Riverside).
- Criterio C: Minimización tiempo de implementación.
- Criterio D: Maximización confiabilidad operacional. (factor de servicio, seguridad y mantenimiento).
- Criterio E: Minimización costos de inversión.

2. Ponderación de los criterios de decisión. Se utilizó el método de decisión múltiple binaria (MDMB). Se comparó cada criterio con base uno a uno y se elaboró

una matriz de comparación de criterios. Se determinaron el peso de cada criterio en una escala de valoración de 0 a 100%. Se jerarquizó los criterios de mayor porcentaje (más importante, mayor impacto) a menor porcentaje.

3. Comparación y evaluación de cada alternativa en función de cada criterio de decisión. Se elaboró una matriz de comparación de cada alternativa con base una a una para cada criterio. Se utilizó el Método de Decisión Múltiple Binario (MDMB). Se elaboró una matriz de evaluación final.

4. Selección de la solución de ingeniería más favorable para la recuperación del concentrado. Se seleccionó la alternativa de la matriz de evaluación final que obtuvo más puntuación, como la solución más favorable.

III.5.- Fase 5. Definir los requerimientos de diseño de la solución seleccionada

Estrategia

Esta fase consistió, una vez definida la solución más favorable para la recuperación del concentrado de ósmosis inversa, en realizar el diseño de la ingeniería conceptual para definir los requerimientos de diseño necesarios para la construcción y operación de la solución seleccionada.

Actividades

Las actividades que se realizaron fueron:

1. Diseño de ingeniería conceptual. Abarca

- Especificaciones de la calidad de la mezcla agua de concentrado y de agua de pozo.
- Criterios de diseño
- Dimensionamiento y especificación de equipos y tuberías.
- Diagrama de flujo de proceso y balance de masa
- Filosofía de operación y control
- Alcance de trabajos para implementar la solución de ingeniería seleccionada.

- Estimado de costos

Producto de esta fase

Definición y documentación de los requerimientos necesarios de diseño para lograr la construcción y operación de la solución seleccionada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se muestra los resultados y discusión de los resultados obtenidos durante la realización de la investigación de campo, los cuales permitieron lograr el objetivo general del trabajo especial de grado, analizar la factibilidad para la recuperación del concentrado del sistema de ósmosis inversa de Pepsi-Cola Venezuela C.A, para darle uso dentro de la Planta San Pedro.

A continuación se resumen los resultados y análisis en relación a los objetivos específicos planteados.

IV.1.- Desempeño del sistema de ósmosis inversa

El funcionamiento del sistema, está influenciado por la calidad del agua de alimentación y por las condiciones de operación: flujo de agua de alimentación, presión, temperatura y flujo de permeado producido.

Durante la evaluación del sistema se comparó los valores promedio de operaciones con las especificaciones de diseño del sistema de tecnología de membranas BW30-400 FILMTEC TM, y con los valores promedio de operación históricos de los años 2008-2009.

IV.1.1.- Calidad y clasificación del agua de pozo.

Calidad del agua. En la Tabla N° 12, se resumen los resultados de la composición del agua de alimentación al sistema.

Tabla N° 12. Calidad del agua de pozo en periodo de sequía y lluvia

Parámetros	Promedio Años 2008-2009	Periodo de sequía						Prom sequia	Periodo de lluvia		Prom. lluvia	Promedio Nov-2009/Jun-2010
		Nov 2009	Dic 2009	Ene 2010	Feb 2010	Mar 2010	Abr 2010		May 2010	Jun 2010		
Magnesio (mg/L como Mg^{+2})	5	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4,5	4
Calcio (mg/L de Ca^{+2})	71	70	61	57	58	61	66	62	74	81	77,5	66
Hierro (mg/L Fe total)	0,01	0,05	0,00	0,03	0,01	0,00	0,03	0,02	0,01	0,04	0,03	0,02
Alcalinidad (mg/L $CaCO_3$)	184	182	175	173	187	185	166	178	184	190	187	180
Dureza total (mg/L de $CaCO_3$)	195	190	167	156	159	166	179	169	202	221	211	180
Cloruros (mg/L)	11	11	11	11	10	11	12	11	12	12	12	11
Sulfatos (mg/L como SO_4)	57,0	40,0	27,0	29,6	33,9	30,2	38,9	33,3	34,2	42,5	38,3	35,0
Fosfatos (mg/L)	0,03	0,03	0,00	0,03	0,01	0,04	0,03	0,02	0,08	0,07	0,07	0,04
Sólidos totales disueltos (mg/L)	291	304	307	303	297	316	316	307	320	332	326	312
Conductividad ($\mu S/cm$)	455	475	480	474	464	494	494	480	500	519	510	488
pH	7,66	7,80	7,65	7,81	7,40	7,61	7,71	7,66	7,82	7,85	7,84	7,71
Color	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente		Transparente	Transparente		
Sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin Sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor		Sin sabor	Sin sabor		
Olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor		Sin olor	Sin olor		

Los resultados de las concentraciones mostrados en la Tabla N° 12 para el periodo noviembre 2009 - junio 2010, fueron obtenidos de los análisis fisicoquímico, y organolépticos, realizados en el laboratorio central de Pepsi Cola Venezuela, de la Planta San Pedro para muestras de agua de pozo, tomadas durante ocho (8) meses, considerando periodo de sequía y de lluvia, y los resultados promedios de los años abril 2008 y 2009 octubre, se obtuvieron de la recopilación de los datos históricos.

Se comparó, los valores promedio del periodo noviembre 2009 - junio 2010, con los valores promedio históricos de los años 2008-2009, mostrando que la calidad de agua de pozo se mantiene relativamente estable, desde que inicio operación el sistema de ósmosis, en abril 2008. Se observa una ligera tendencia de aumento, de los valores de concentraciones en periodo de lluvia respecto al periodo de sequía. Los resultados de la concentración promedio para el periodo de lluvia, de los iones Mg^{+2} (4,5 mg/L), Ca^{+2} (77,5 mg/L), SO_4^{-2} (38,3 mg/L), influyen el porcentaje de recuperación de

permeado y la concentración de los STD (326 mg/L) impacta en la presión de alimentación. Estos resultados, muestran un aumento de concentración respecto al periodo de sequía para los mismos parámetros de análisis de 4 mg/L, 62 mg/L, 33,3 mg/L y 307 mg/L respectivamente.

En la Tabla N° 13 se muestra los resultados de los análisis microbiológicos del agua de pozo, los cuales fueron realizados en el Laboratorio Central de Planta San Pedro.

Tabla N° 13. Parámetros microbiológicos del agua de pozo

Parámetros	Mesófilos	Coliformes			Pseudomonas		Enterococos
	PCA 37°Cx48h	Endo-B 37°Cx24h			Cetrimide 37°Cx48h		S&B 37°Cx48h
	ufc/100mL	ufc/100mL			ufc/100mL		ufc/100mL
		No coliformes	Total	Fecal	Aeruginosa	total	
Noviembre-09	0	0	0	0	0	0	0
Diciembre-09	0	0	0	0	0	0	0
Enero-10	0	0	0	0	0	0	0
Febrero-10	0	0	0	0	0	0	0
Marzo-10	0	0	0	0	0	0	0
Abril-10	0	0	0	0	0	0	0
Mayo-10	0	0	0	0	0	0	0
Junio-10	0	0	0	0	0	0	0

Los resultados de la Tabla N° 13 evidencian que el agua de pozo de planta San Pedro no presenta carga microbiológica apreciable, por lo cual se considera un agua de calidad en conformidad con los criterios de la normativa de agua potable Decreto N° 3818.

Clasificación del agua. En complemento a las Tabla N° 12 y 13, en la Figura N° 11, se delinean los resultados de los parámetros físicoquímicos del agua de pozo de la Planta San Pedro, analizados durante los años 2008-2009 y 2010.

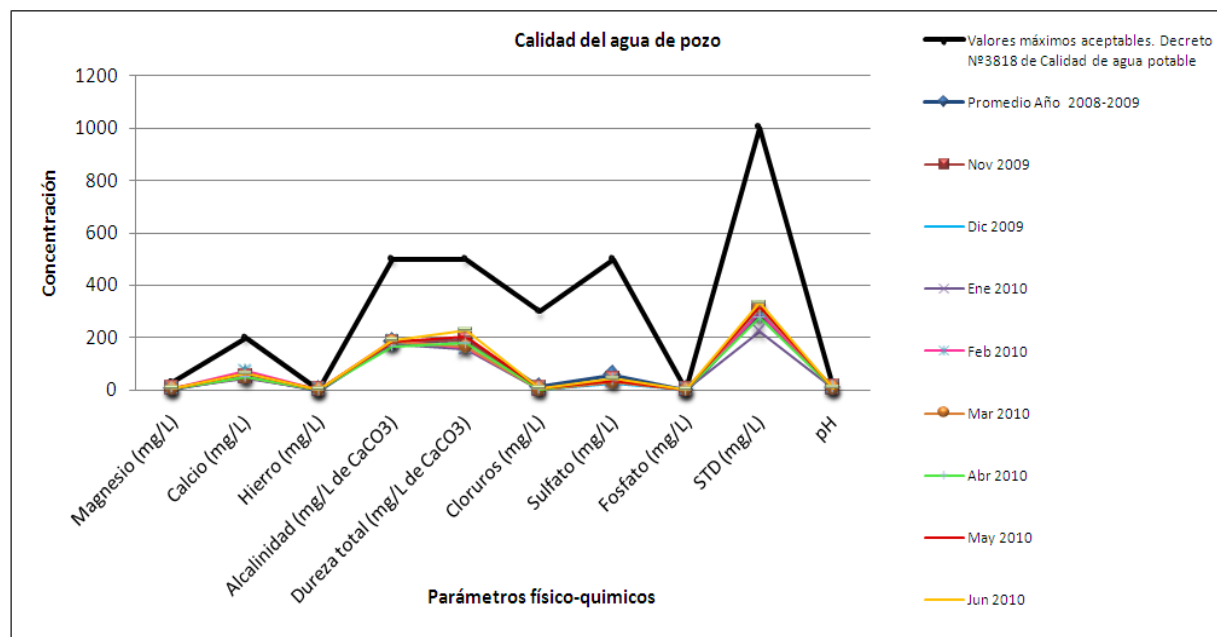


Figura N° 11. Calidad del agua de pozo y cumplimiento Decreto N° 3818 para agua potable

Se observa en la Figura N° 11 que los valores de los parámetros físicoquímicos del agua de pozo analizados se encuentran por debajo de los valores límites máximos permitidos por la regulación venezolana en el Decreto N° 3818 para calidad del agua potable. Esta agua de pozo, puede ser empleada para servicios generales y para riego.

IV.1.2.- Condiciones de operación del sistema de ósmosis inversa

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de las lecturas de las condiciones actuales de operaciones: tiempo de operación del sistema, flujo de agua de alimentación, flujo de permeado, presión y temperatura en las membranas, a través del panel de control y del balance de masa, medidos durante ocho (8) meses de monitoreo, periodo de sequía y de lluvia, y de los resultados histórico del periodo abril 2008-octubre 2009, con el fin de validar el funcionamiento del sistema de

ósmosis inversa, de tecnología membranas BW30-400 FILMTEC™. Se utilizó el software ROSA, Reverse Osmosis System Analysis, elaborado por The Dow Chemical Company para simular el funcionamiento del sistema.

Tiempo de operación del sistema y consumo de agua

El sistema de ósmosis inversa, no opera diariamente. Los resultados de las lecturas medidas y registradas de tiempo de operación y del consumo de agua se muestran en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14. Relación entre tiempo de operación y consumo de agua del sistema de ósmosis inversa.

Fecha	Tiempo de operación del sistema (h)	Alimentación agua de pozo (L)	Concentrado (L)	Permeado (L)
nov-09	52,3	865.864	346.346	519.518
dic-09	31,6	523.992	209.597	314.395
ene-10	47,3	780.910	312.364	468.546
feb-10	41,5	679.106	278.433	400.673
mar-10	72,2	1.160.631	475.859	684.772
abr-10	100,1	1.621.376	680.978	940.398
may-10	94,1	1.527.344	626.211	901.133
Promedio	63,0	1.022.746	418.541	604.205

Se observa que el tiempo mínimo de operación, fue de 31 horas y el tiempo máximo de 94 horas al mes, con un tiempo promedio de operación de 63 horas mensuales, equivalente a 2 horas por día. El consumo mínimo de agua de alimentación al sistema, proveniente de pozo, fue de 679.106 L, el máximo de 1.621.376 L y el promedio 1.022.746 L al mes, para una producción de agua de permeado mínima de 314.395 L y máxima 940.398 L y un volumen mínimo de agua de concentrado de 209.597 L y un máximo de 680.978 L.

Flujo de agua de alimentación.

El flujo de alimentación de agua de pozo al sistema se determinó por el balance de masa. En la Tabla N° 15, se observa que el valor de caudal promedio de agua de pozo es de 72,74 gpm y de 83,18 gpm de agua de alimentación a la primera etapa del sistema, considerando flujo de recirculación de 10,44 gpm, para el periodo noviembre 2009-abril 2010. La Tabla N° 10, muestra los resultados de los valores de operaciones actuales por mes, comparados con los valores histórico del periodo 2008-2009 y el promedio para el periodo noviembre 2009 – junio 2010. Los resultados demuestran que el sistema actual, viene operando con un 14 % por encima del caudal de agua de alimentación respecto al promedio de los años 2008-2009, sin embargo, el sistema tiene capacidad para manejar satisfactoriamente este cambio, porque el máximo caudal de alimentación por diseño, a las membranas BW30-4000 FILMTEC™ es de 85 gpm. El aumento de caudal de agua de pozo al sistema impacta en la disminución del porcentaje de recuperación de permeado producido, pasando de 70 % en los años 2008-2009 a 60 % en el 2010.

Tabla N° 15. Comparación de variables actual de operación con histórico 2008-2009 del sistema de ósmosis inversa, tecnología membranas BW30-400 FILMTEC™

Variables	Condiciones de operación histórico 2008-2009	Lecturas de condiciones de operación Periodo noviembre 2009 – junio 2010								Condiciones operación promedio
		Periodo de sequia						Periodo de lluvia		
		Nov-2009	Dic- 2009	Ene-2010	Feb-2010	Mar-2010	Abr-2010	May-2010	Jun- 2010	
Caudal de agua de pozo al sistema (gpm)	62,88	73,2	72,93	72,64	72,57	72,57	71,4	71,59	73,12	72,74
Caudal de agua de alimentación 1ª etapa (gpm)	73,36	83,59	83,27	83,17	83,4	82,72	82,26	81,68	83,45	83,18
Caudal de permeado (gpm)	44,02	44,05	43,64	43,37	43,13	42,68	41,76	42,49	43,55	43,08
Caudal de concentrado del sistema (gpm)	18,86	29,15	29,29	29,27	29,44	29,89	29,64	29,1	29,57	29,66
Caudal de recirculación concentrado (gpm)	10,48	10,39	10,34	10,53	10,83	10,15	10,86	10,09	10,33	10,44
Temperatura entrada membrana (°C)	45	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Presión entrada membranas (psig)	150	139	139	139	139	140	140	139	138	139
Eficiencia del sistema	70%	60%	60%	60%	60%	60%	58%	59%	60%	60%
Porcentaje de rechazo (concentrado)	30%	40%	40%	40%	41%	40%	42%	41%	40%	40%

IV.1.3.- Índice de eficiencia o de recuperación del sistema.

Se determinó por relación matemática de flujo de permeado producido entre flujo de agua de pozo de alimentación, por ciento, resultando 60% para el año 2010, valor por debajo del porcentaje de 70% para los años 2008-2009 y de 77% respecto a la especificación de diseño, ver Tabla N° 2. El valor de 60% de recuperación, puede

deberse al nivel de ensuciamiento de las membranas o una insuficiente presión a la entrada de las membranas.

Estos resultados totales del desempeño del sistema de osmosis inversa, se confirmaron utilizando la herramienta de software DEMO ROSA versión 6.1, The Dow Chemical, son mostrados en el Apéndice E.

IV.2.- Calidad y clasificación del agua de concentrado

Calidad de agua de concentrado. En la siguiente Tabla N° 16, se resumen los resultados de los análisis de los parámetros fisicoquímicos, organolépticos y en la Tabla N° 17 resultados de los análisis microbiológicos del concentrado, registrados durante el funcionamiento del sistema de osmosis inversa, para el periodo entre los meses de noviembre de 2009 y junio de 2010. Los análisis de estos parámetros, fueron realizados en el Laboratorio Central de Pepsi-Cola Venezuela, Planta San Pedro, cumpliendo con los métodos y técnicas especificados en las Normas COVENIN, ver Tabla N° 7, de este documento.

Tabla N° 16. Calidad del agua de concentrado del sistema de ósmosis inversa.

Parámetros	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Prom sequía	May	Jun	Prom lluvia
	2009	2009	2010	2009	2010	2010		2010	2010	
	Periodo de sequía							Periodo de lluvia		
Sodio (mg/L)	29	26	25	31	28	33	29	35	34	34
Magnesio	11,3	11,6	11,3	10,9	10,4	11,0	11	9,92	11,20	11,0
Calcio	186	181	184	179	170	184	174	173	188	180
Hierro (mg/L)	0,03	0,01	0,0	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,0
Alcalinidad (mg/L de	294	310	325	347	344	360	331	331	395	363
Dureza total (mg/L CaCO3)	508	495	502	489	463	503	471	471	513	492
Dureza cálcica (mg/L CaCO3)	457	446	452	440	417	453	424	424	462	443
Dureza magnésica (mg/L CaCO3)	51	50	50	49	46	50	47	47	51	49
Cloruros (mg/L Cl ⁻)	23	21	24	22	28	22	28	28	26	25
Sulfato (mg/L)	165	134	126	159	145	173	150	187	177	182
Fosfato (mg/L)	0,15	0,12	0,15	0,16	0,15	ND	0,15	0,1	0,13	0,0
Sólidos disueltos totales	625	656	628	637	621	619	631	677	685	681
pH	7,99	7,6	7,7	7,86	7,61	7,76	8,0	7,99	7,80	8
Conductividad (µmhos/cm)	977	1003	982	996	971	967	983	1006	1007	1007
Color	Transpa rente	Trans paren	Transpa rente	Trans parent	Trans paren	Transp arente		Transpa rente	Transpa rente	
Sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor	Sin sabor		Sin sabor		
Olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Sin olor		Sin olor	Sin olor	

En la Tabla N° 16, se resumen los resultados de la composición del agua de concentrado obtenidos del análisis de los cationes, aniones, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, color, sabor y olor. Se observa que los resultados de la concentración promedio tienen una tendencia de aumento durante el periodo de lluvia respecto al periodo de sequia. Se tienen las variaciones: sodio de 29 a 34 mg/L, calcio de 174 a 180 mg/L, alcalinidad de 331 a 363 mg/L, dureza total de 471 a 492 mg/L, STD de 631 a 681 mg/L y conductividad de 983 a 1007 μ mhos/cm. Los resultados de las características organolépticas sin olor, sin sabor y olor aparente se mantienen constantes.

En complemento a los resultados de la Tabla N° 16, se delinean en la Figura N° 12, la comparación de los parámetros fisicoquímicos del concentrado con los valores máximos aceptables por la normativa sanitaria de calidad del agua potable, Decreto N° 3818, lo cual permite evaluar la calidad del concentrado de ósmosis inversa con dicha normativa.

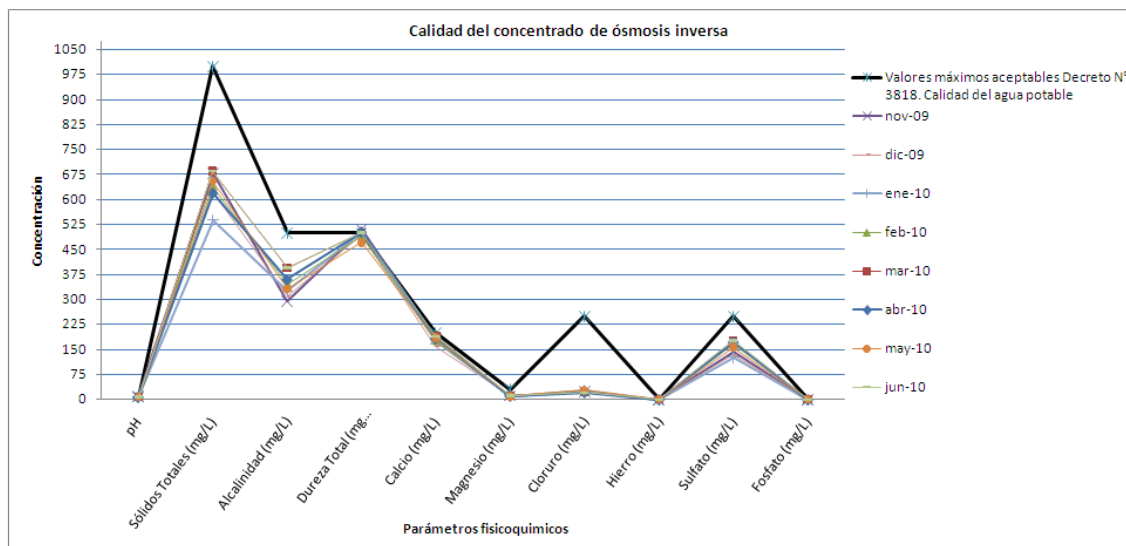


Figura N° 12. Calidad del concentrado de ósmosis inversa y cumplimiento Decreto N° 3818

Los resultados mostrados en la Figura N° 12 indican que los parámetros de calidad del concentrado de ósmosis inversa se encuentra por debajo de los valores máximos permitidos por la normativa sanitaria de calidad de agua potable Decreto N° 3818, sin embargo, valores como la dureza total (mg/L CaCO₃) se encuentra muy cercana al límite permitido, evidenciándose que se excede ligeramente del límite permisible en los meses de noviembre 2009, abril y junio de 2010. Los valores de los sólidos totales disueltos registrados se encuentran dentro del rango exigido por la normativa cuyo valor máximo se ubica en 1000 mg/L.

En la siguiente Tabla N° 17, se muestra los resultados de los parámetros microbiológicos analizados en el concentrado de ósmosis inversa para las diferentes muestras, dichos análisis fueron realizados siguiendo los procedimientos descritos en el capítulo III de este documento.

Tabla N° 17. Parámetros microbiológicos del concentrado

Parámetros	Mesófilos	Coliformes			Pseudomonas		Enterococos
	PCA 37°Cx48h	Endo-B 37°Cx24h			Cetrimide 37°Cx48h		S&B 37°Cx48h
	ufc/100mL	ufc/100mL			ufc/100mL		ufc/100mL
		No coliformes	Total	Fecal	Aeruginosa	total	
Noviembre-09	0	0	0	0	0	0	0
Diciembre-09	0	0	0	0	0	0	0
Enero-10	0	0	0	0	0	0	0
Febrero-10	0	0	0	0	0	0	0
Marzo-10	0	0	0	0	0	0	0
Abril-10	0	0	0	0	0	0	0
Mayo-10	0	0	0	0	0	0	0
Junio-10	0	0	0	0	0	0	0

Los resultados mostrados en la Tabla N° 17 indican que el concentrado no presenta carga microbiológica, por lo cual cumple con las normativas sanitarias de calidad de agua potable Decreto N° 3818.

IV.2.1.- Índice de relación de absorción de sodio (RAS)

A partir de las concentraciones promedio de los cationes sodio, calcio y magnesio de las diferentes muestras, se determinó los resultados del índice RAS, usando la Ecuación 1, definida en la sección II.2.1.3 del capítulo II de este documento y mostrados en la Tabla N° 18. Con estos resultados de RAS y con de los conductividades fueron usados para determinar la clasificación de agua de riego, usando las Normas de Riverside, mostrada en la Figura N° 7, del capítulo II.

Tabla N° 18. Índice de absorción de sodio RAS y conductividad promedio de concentrado.

	Nov-09	Dic-09	Ene-10	Feb-10	Mar-10	Abr-10	May-10	Jun-10	Promedio
Calcio (meq/L)	9,07	8,00	8,82	8,76	8,14	9,18	9,24	9,49	8,84
Magnesio (meq/L)	0,81	0,95	0,93	0,90	0,86	0,00	0,82	0,92	0,79
Sodio (meq/L)	1,26	1,13	1,09	1,35	1,22	1,43	1,52	1,39	1,30
Índice RAS	0,57	0,53	0,49	0,61	0,57	0,67	0,68	0,61	0,59
Conductividad μS/cm (=μmhos/cm)	977	1003	982	996	971	967	1006	1007	995

En la Tabla N° 18 se observa que el concentrado presenta un índice de absorción de sodio (RAS) promedio de 0,59 y una conductividad de 995 μmhos/cm. Obtenidos estos valores se empleó la Figura N° 9, del capítulo II relacionada con las normas de Riverside que permite evaluar la calidad del agua destinadas a riego.

La evaluación de la calidad del concentrado de ósmosis inversa se clasificó C3-S1, alta salinidad y bajo sodio. La clasificación tipo C3, está relacionada con el valor de conductividad, el cual representa el grado de salinidad que tiene el agua. Válido para un nivel alto de salinidad, cuyo rango está comprendido entre 750 y 2250 $\mu\text{mhos/cm}$, según indica la Figura N° 9.

El agua de alta salinidad puede ser utilizada para el riego con precaución tomando en cuenta que el suelo que está siendo regado tenga buen drenaje, es decir, suelos que no estén saturados con agua. La clasificación tipo S1 presenta un rango de índice RAS menor al 10, este tipo de agua puede ser utilizada en casi cualquier suelo y el riesgo de acumulación de sodio es mínimo.

Tanto los valores de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del concentrado se encuentran en conformidad con los límites y rangos de las características del agua del sub-tipo 2A y 2B del decreto N° 883 que se muestran en la Tabla N° 3 de este documento, así pues el concentrado de ósmosis inversa de Planta San Pedro se encuentra en la clasificación de agua apta para el riego de cualquier tipo de cultivo y para riego de vegetales destinados al consumo humano.

IV.3.- Evaluación y selección de las alternativas de recuperación de agua de concentrado, usando el método de decisión múltiple binaria

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos, referente a las alternativas viables, criterios o variables de decisión y ponderación para seleccionar las alternativas, la comparación y evaluación de las alternativas, en función de cada criterio, usando el método de decisión múltiple binaria (MDMB) definido en la sección II.2.1.5 de este documento. Se seleccionó la alternativa más adecuada para el reuso del agua recuperada de concentrado del sistema de ósmosis inversa, la que obtuvo mayor puntuación en la matriz de evaluación final. La aplicación del método MDMB y los resultados detallados son mostrados en el Apéndice H.

IV.3.1.- Alternativas y criterios.

Se definieron las alternativas y los criterios de decisión, los cuales fueron concertadas con la gerencia técnica, gerencia de aseguramiento de la calidad de la Planta y con la gerencia de proyectos de la Empresa Polar.

Alternativa 1 (ALT 1). Reuso del agua de concentrado para agua de riego

Consiste en el reusó de un volumen mínimo de agua de concentrado de 209.597 y un máximo de 680.978 litros por mes, como agua únicamente para riego de jardines y áreas verdes de Planta San Pedro. El volumen de agua de pozo que se emplea para riego actualmente se ubica en un promedio mensual de 116.000 litros de agua de pozo en periodo de sequía mientras que en periodo de lluvia el volumen de agua para riego se encuentra en un promedio de 56.000 litros mensuales.

Alternativa 2 (ALT 2). Reuso del agua de concentrado para agua de servicios generales de la Planta.

Consiste en el reuso de un volumen mínimo de agua de concentrado de 209.597 y un máximo de 680.978 litros por mes, como agua únicamente para servicios generales de la Planta San Pedro, incorporándola a través de la mezcla con el consumo de agua de pozo. El consumo promedio mensual de agua de pozo que se emplea para servicios generales es de 1.930.132 litros.

Alternativa 3 (ALT 3). Reuso del agua de concentrado simultáneamente para agua de servicios generales de la Planta y para agua de riego.

Consiste en el reuso de un volumen mínimo de agua de concentrado de 209.597 y un máximo de 680.978 litros por mes de agua de concentrado, mezclada para agua de servicios generales como para agua de riego de las áreas verdes de la planta.

Alternativa 3 (ALT 3). Reuso del agua de concentrado simultáneamente para agua de servicios generales de la Planta y para agua de riego.

Consiste en el reuso de un volumen mínimo de agua de concentrado de 209.597 y un máximo de 680.978 litros por mes de agua de concentrado, mezclada para agua de servicios generales como para agua de riego de las áreas verdes de la planta.

Los criterios o variables de decisión establecidos fueron: maximización del uso del agua de concentrado (Criterio A), maximización de la calidad del agua (Criterio B), minimización del tiempo de implementación de la alternativa (Criterio C), maximización de la confiabilidad operacional (Criterio D) y minimización del costo de inversión (Criterio E). Se determinó la ponderación o peso de cada criterio, usando el método de decisión múltiple binaria (MDMB), resultando la priorización e importancia de los criterios de la manera siguiente: Criterio A 40 %, Criterio D 30 %, Criterio B 10 %, Criterio C 10 % y Criterio E 10 %, como se muestran en la Tabla N° 19.

Tabla N° 19. Matriz de evaluación de criterios de decisión usando MDMB

	A	B	C	D	E	SP	Peso(%)
A		1	1	1	1	4	40,00
B	0	-	0	0	1	1	10,00
C	0	0	-	0	1	1	10,00
D	1	0	1	-	1	3	30,00
E	0	0	1	0	-	1	10,00
Total						10	100,00

IV.3.2.- Comparación y calificación de las alternativas en función de los criterios de decisión.

En la Tabla N° 20, a continuación, se resumen los resultados de la evaluación de las tres (3) alternativas en función de cinco (5) criterios de decisión y usando el método de decisión múltiple binaria (MDMB).

Tabla N° 20. Matriz de evaluación final de alternativas usando MDMB

Criterios de decisión	Peso (%)	ALT 1 (%)	ALT 2 (%)	ALT 3 (%)
A: Maximización uso del agua de concentrado	40	0	13,3	26,67
B: Maximización calidad del agua	10	3,33	3,33	3,33
C: Minimización tiempo de implementación	10	5,00	5,00	0,00
D: Maximización confiabilidad operacional	30	20,00	0,00	10,00
E: Minimización costo de inversión	10	6,67	3,33	0,00
Puntuación Final (%)	100	35	25	40

Se observa que la alternativa ALT 3 tiene la mayor puntuación, de 40 puntos, seguidamente por la ALT 1 con 35 puntos y finalmente la ALT 2 con 25 puntos, resultando que **la solución de ingeniería más favorable para la recuperación del concentrado del sistema de ósmosis invertida, es la ALT 3 “Reuso del agua de concentrado para agua de servicios generales de la Planta y para agua de riego simultáneamente”**.

IV.4. Diseño de ingeniería conceptual y alcance de trabajos para la implementación de la solución de ingeniería más favorable.

Se realizó el diseño conceptual y se determinaron los requerimientos de diseño que deben seguirse para la implementación de la solución de ingeniería seleccionada.

Los requerimientos de diseño son:

1. Especificaciones de la mezcla de agua de pozo y agua de concentrado

Consumo de agua de pozo

Volumen de agua para riego 56.000 – 116.000 Litros mensuales.

Volumen de agua para servicios generales 1.930.132 Litros mensuales.

Consumo de agua de concentrado

Volumen mínimo 209.597 Litros mensuales

Volumen máximo 680.978 Litros mensuales.

Características fisicoquímicas del agua mezclada

En la Tabla N° 21 se muestran los valores de las características fisicoquímicas máximas registradas del concentrado y agua de pozo, y las de la mezcla de estas dos corrientes de agua. La relación empleada en el mezclado está basada en la cantidad de agua que se emplea para servicios generales, riego y el volumen de agua de concentrado producido por el sistema de ósmosis inversa mensualmente, la relación de mezclado agua de pozo y agua de concentrado se ubica entre 1:5 para los valores máximos y 1:9 para los mínimos.

Tabla N° 21. Caracterización de la mezcla de agua de concentrado con agua de pozo

		pH	STD (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	Calcio (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Hierro (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Fosfato (mg/L)
Concentrado		7,82	678	360	503	188	28	0,06	173	12	0,15
Pozo crudo		7,6	295	180	147	46	2,7	0,0	30	5	0,1
Mezcla agua de pozo y concentrado	Máx	7,7	359	210	207	70	7	0,01	54	6	0,1
	Min	7,6	334	198	183	60	5	0,0	44	6	0,1

En la Tabla N° 21 se observa que la calidad de agua de la mezcla de agua de pozo y concentrado se encuentra en conformidad con la normativa Decreto N° 3818, siendo el agua de calidad suficiente para todas las usuarios y actividades que requieren agua de pozo.

2. Criterios de diseño

Criterios de sobre diseño: 1,20

Velocidad líneas de succión bomba centrifuga: 0,3 – 1,2 m/s

Caída de presión: 0,01 – 0, 05 bar/ 100 m

Velocidad líneas de descarga bombas centrifuga: 1,5 – 4,6 m/s

Caída de presión: 0,2 – 0, 45 bar/ 100 m

Velocidad línea agua drenaje: 1,2 – 2,1 m/s

Línea de transferencia por gravedad: 0.9 – 1,8 m/s

Caída de presión: 0,06 – 0,08 bar/100 m

Se dispondrán de los tanques existentes T-101 y T-102.

Capacidad de almacenamiento de agua en tanque: 1 día

Los equipos y tuberías serán diseñados para una vida útil de 20 años.

Material: Acero al carbono (Galvanizado).

Instalar al menos una bomba de respaldo en cada grupo de bombas.

Todos los lazos de control serán instrumentos para total automatización.

La simbología y las normas a usar son las de Empresa Polar.

La simbología para instrumentos es I.S.A.

3. Dimensionamiento y especificación de tuberías y bombas

- Tuberías de diámetro de 2 pulgadas. Material galvanizada.
- Bomba centrífuga de 2 hp.

4. Diagrama de flujo de proceso y balance de masa

Se delineó el diagrama de flujo de proceso (DFP) y se determinó el balance de masa referidos a las corrientes numeradas que se indican en el dibujo DFP, mostrado en el Apéndice G de este documento.

5. Filosofía de operación y control

El agua que proviene de pozo, es enviado al tanque T-101 para abastecer los requerimientos de agua de servicios generales de la planta, y enviada como agua de alimentación cada vez que se enciende el sistema de tratamiento con ósmosis inversa X-101. El concentrado, producto del proceso de tratamiento del agua de pozo en el sistema de ósmosis inversa X-101, es impulsado a través de la bomba centrífuga P-105 al tanque T-101 de capacidad 100 m^3 el cual se dispondrá como tanque pulmón que suministra el agua para riego y para el tanque T-102 de capacidad 250 m^3 .

El tanque T-102 presenta un sistema de control de nivel que permite mantener el almacenamiento del concentrado entre un nivel mínimo de 30 m³ y un máximo de 90 m³, y actuará en conjunto con el sistema de control de nivel del T-101 el cual se encuentra entre un mínimo de 100 m³ y un máximo de 180 m³.

En el momento en el que el nivel del tanque T-101 alcance su mínimo se activará la bomba de succión P-101 de agua de pozo habitual y la bomba P-103 de interconexión entre ambos tanques, así como la bomba de recirculación P-102 y la bomba dosificadora de cloro, con lo cual el tanque se llenará con ambas corrientes de líquido, agua de pozo y concentrado de ósmosis inversa. Una vez que se haya alcanzado de nuevo el nivel máximo en el tanque

T-101 se apagarán las bombas anteriormente mencionadas. Si el nivel en el tanque T-102 desciende hasta su valor mínimo de 20 m³ se apagará la bomba de interconexión P-103.

La bomba P-103 será empleada también para uso de riego, cuando se requiera realizar el riego de jardines y áreas verdes de la Planta se debe colocar dicha bomba en modo manual y de esta manera destinar el concentrado almacenado en el T-101 para tal fin.

6. Alcance de trabajos para implementar la solución de ingeniería seleccionada.

Los trabajos a realizar para la construcción y operación de la recuperación del agua de concentrado son:

6.1 Realizar la ingeniería básica y de detalle.

6.2 Comprar equipos y materiales

- 2 Bombas de 2 hp: una (1) para la transferencia del agua de concentrado desde la salida del sistema de ósmosis hasta el tanque T-102 y una (1) para reemplazar la bomba existente P-103.
- 2 Válvulas de retención (check).

6.3 Instalar, construir y poner en operación

Bomba P-103, medidor de nivel y línea de interconexión entre tanques

- Instalar una (1) bomba de succión en el tanque T-102 para reemplazar la bomba existente P-103, con su respectiva instalación de electricidad.
- Instalar una válvula de bloqueo en la línea de succión, aguas arriba del filtro y en las líneas de descarga de cada bomba.
- Instalar una válvula de retención (check) en la descarga de cada bomba.
- Instalar tubería de 2 pulgada, puntos de enlace, válvulas y accesorios, para interconectar los tanques T-102 y T-101. El tramo de interconexión es desde la descarga de la bomba P-103 hasta el tanque T-101.
- Instalar un instrumento de medición de nivel en el tanque T-102 y llevar la señal al panel de control, con su respectiva instalación de electricidad.
- Realizar prueba hidráulica y puesta en marcha asegurando confiabilidad operacional.
- 80 m de tubería galvanizada de 2 pulgada de diámetro y accesorios para puntos de enlace (Tie in).
- 1 instrumento de medición de nivel para el tanque.

Bomba P-105 y línea de transferencia

- Construir la fundación de la bomba P-105.
- Instalar una (1) bomba de transferencia P-105 de agua de concentrado a la salida del sistema de ósmosis inversa, con su respectiva instalación de electricidad. .
- Instalar una válvula de retención (check) en la descarga de cada bomba.
- Instalar una válvula de bloqueo en la línea de succión, aguas arriba del filtro y en las líneas de descarga de cada bomba.
- Instalar tubería de 2 pulgada para transferencia de agua de concentrado, los puntos de enlace, válvulas y accesorios, desde la salida del sistema de ósmosis hasta el tanque T-102.

- Realizar prueba hidráulica y puesta en marcha asegurando confiabilidad operacional.

7. Estimado de costos

El costo de inversión para la ejecución de los trabajos de ingeniería de detalle, procura, construcción y puesta en marcha para implementar la solución de reuso del agua de concentrado simultáneamente como agua de servicios generales y agua de riego a través de un proyecto es de 64.992 bolívares. El tiempo estimado de ejecución es de dos (2) meses.

La Tabla N° 22, muestra los resultados de la estructura de costo, correspondiendo el 8 % a ingeniería, el 44 % a la procura y el 48 % del costo de inversión a la construcción.

Tabla N° 22. Estructura de costo de inversión de la solución de ingeniería seleccionada

Estructura de costo	(BsF)	% Costo Inversión
INGENIERÍA Y SUPERVISIÓN	5.041	8%
PROCURA	29.021	44%
Equipos	15.754	
Tuberías y accesorios	8.226	
Instrumentación	4.411	
Electricidad	630	
INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	30.929	48%
Civil	473	
Instalación de equipos	6.144	
Instalación tuberías y accesorios	3.208	
Instalación instrumentación	1.720	
Instalación electricidad	246	
Gastos de construcción	11.318	
Contingencia	5.213	

Utilidad de contratista	2.607	
COSTO DE INVERSIÓN	64.992	100%

El estimado de costos se determinó utilizando lista de precios y factores de orden de magnitud, con base al alcance de trabajos a realizar.

CONCLUSIONES

Desempeño del sistema de ósmosis

- El sistema de ósmosis inversa no viene funcionamiento bien, ya que no se está logrando alcanzar la meta de igual o mayor del 70 % de recuperación de permeado.

Calidad del agua de concentrado y agua de pozo

- La calidad del agua de pozo y la calidad de agua de concentrado son aptas para uso de de servicios generales y para riego, en conformidad con el Decreto N° 3818.
- La calidad del agua de concentrado es de C3-S1, alta salinidad y bajo sodio, en conformidad con la norma Riverside, con lo cual se puede emplear para riego en todo tipo de suelo.

Factibilidad de recuperación del agua de concentrado

- El estudio, determinó la viabilidad de la recuperación del agua de concentrado. La solución de ingeniería más favorable para la recuperación del concentrado del sistema de ósmosis invertida, seleccionada con base al método de decisión múltiple binaria, fue la alternativa “Reuso del agua de concentrado para agua de servicios generales de la Planta y para agua de riego simultáneamente”. El tiempo de ejecución será de dos (2) meses y el costo de inversión de 65.000 bolívares para la implementación y puesta en marcha.

RECOMENDACIONES

1. Definir la planificación y meta de reúso de agua de concentrado, al inicio de cada año fiscal de Pepsi Cola_Venezuela, C.A., Planta San Pedro. Debe comunicarse al personal.
2. Operar el sistema de ósmosis para alcanzar un % de recuperación igual o mayor del 70 % de agua de permeado.
3. Evaluar el programa y el procedimiento de limpieza química de las membranas BW30-400 FILMTEC TM del sistema ósmosis inversa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“Comparing actual performance of Filmtec Elements to ROSA Projection” Disponible en: http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh_0035/0901b80380035b70.pdf [Consultada 2010-02-11].

“Design equations and Parameter Filmtec Membranes ” (1999) Disponible en: http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh_0036/0901b803800362e9.pdf. [Consultada 2010-02-11].

“Detalles de Ósmosis inversa.” Disponible en: http://www.aquapurificacion.com/detalles_osmosis_inversa.htm [Consultada 2009-12-9].

“Filmtec's Rosa Reverse Osmosis System Analysis” Diponible en: <http://www.dow.com/liquidseps/design/rosa.htm>. [Consultada 2010-02-11].

“FILMTEC™ BW30-400” (1999) Disponible en http://www.dow.com/liquidseps/prod/bw30_400.htm [Consultada 2010-02-9].

Sydney Environmental & Soil Laboratory “Water quality for irrigation” (2004). Disponible en: http://www.sesl.com.au/pub/articles/Water_Quality_for_Irrigation.pdf [Consultada 2010-03-30].

“System operating characteristics Filmtec Membranes” (1999) Disponible en: http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh_.pdf [Consultada 2010-02-11].

Badruzzaman M. (2009) “Innovative beneficial reuse of reverse osmosis concentrate

using bipolar membrane electrodialysis and electrochlorination processes”. Journal of Membrane Science Vol. 326, 392-399. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03767388> [Consultada 2010-01-13].

De Souza, M (1997) “Metodología de análisis de decisiones para seleccionar alternativas de tratamiento y uso de aguas residuales” Universidad de Brasilia. Disponible en: <http://www.cepis.org.pe/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt068.html>. [Consultada 2010-02-11].

García, C. (2007) “Aplicación de la ósmosis inversa y la nanofiltración en el acondicionamiento de aguas para calderas” Tesis Doctoral. Disponible en: http://www.tdr.cesca.es/tesis_uov/available/tdr-0711107-131140/uov0013tcfgo.pdf [Consultada 2010-02-17].

Installation and Service Manual (2007) Reverse Osmosis System Severn trent water purification inc.

Jeppesen T. (2009). “Metal recovery from reverse osmosis concentrate”. Journal of Cleaner Production Vol.17 703-707. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09596526> [Consultada 2010-01-13].

Juby, G (2008) “Reverse osmosis recovery maximization” U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Disponible en <http://www.usbr.gov/pmts/water/publications/reportpdfs/report119.pdf> [Consultada 2010-02-11].

Kirda, C (1997) “Assessment of irrigation water quality” Universidad de Cukurova Facultad de Agricultura. Disponible en: <http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a31/CI971550.pdf> [Consultada 2010-02-15].

Li, N. y Fane, A. (2008). “Advanced Membrane Technology and Applications”, New Jersey. 139 p.

Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos Decreto N° 883 Gaceta oficial N° 5.021 del 18/12/1995. Ministerio de Sanidad y Asistencia Social.

Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (Resolución S.G.-018-98). Decreto N° 3.818, Gaceta oficial N° 36.395 del 13/02/1998. Ministerio de Sanidad y Asistencia Social.

Peters, M (1968). “Plant Design and Economics for Chemical Engineers”, 2da ed. Editorial McGraw-Hill.

Rodríguez, A. (2006) “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.” Universidad de Alcalá España. Disponible en:
http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf [Consultada 2009-12-9].

U.S Enviromental Protection Angency, EPA (1996) “Reverse osmosis process” Disponible en: <http://epa.gov/nrmrl/pubs/625r96009/625r96009.pdf>. [Consultada 2009-12-9].

APÉNDICE

APÉNDICE A. Ósmosis inversa de Planta San Pedro

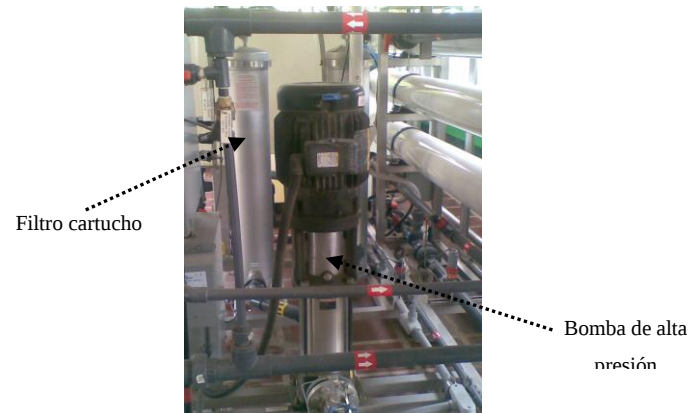


Figura A.1 bomba de alta presión y filtro cartucho del sistema de ósmosis inversa



Figura A.2 recipientes a presión del sistema de ósmosis inversa de planta San Pedro con membranas FILMTEC™ bw30-400



Figura A.3 Drenaje del agua de concentrado a la red de desagüe.

APÉNDICE B. Cálculos analíticos de los análisis fisicoquímicos

- Determinación de cloruros

El contenido de cloruros en la muestra, se expresó en miligramos por litros (mg/L) y se cálculo de la siguiente manera:

$$mg\ Cl / L = \frac{(A - B) \times N \times 35,45}{V} \times 1000 \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

A = Volumen en mL, de la solución de nitrato de plata, gastado en la titulación de la muestra.

B = Volumen en mL, de la solución nitrato de plata, gastado en la titulación del blanco.

N = Normalidad de la solución de nitrato de plata

V = Volumen en mL, de la muestra.

- Determinación de la alcalinidad

Para la determinación de la alcalinidad se empleó la siguiente ecuación:

$$A = \frac{V_{H_2SO_4} \cdot C_{H_2SO_4} \cdot fc}{V_{muestra}} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

A : alcalinidad del agua, mg CaCO_3/L .

$V_{H_2SO_4}$: volumen de ácido sulfúrico empleado en la titulación, mL.

$C_{H_2SO_4}$: concentración de ácido sulfúrico, N.

$V_{muestra}$: volumen de la muestra de agua analizada, mL.

fc : factor de conversión, 50000 mg $\text{CaCO}_3/\text{eqCaCO}_3$.

- Determinación de Dureza total, cálcica y magnésica

Cálculo de la Dureza Total:

$$DurezaTotal(mg / L\text{CaCO}_3) = \frac{A \times B \times 1000}{V_{muestra}(mL)} \quad \text{Ec. (9)}$$

Cálculo de la Dureza Cálcica:

$$DurezaCálcica(mg / LCaCO_3) = \frac{A \times B \times 1000}{Vmuestra(mL)} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

A = volumen de solución de EDTA valorada (mL)

B = miligramos de CaCO₃ equivalentes a 1 mL de solución de EDTA valorada

Como la solución de EDTA (0.01 M) es equivalente a 400.8 µg Ca/1.0 mL, tenemos que:

$$Ca(mgCaCO_3) = mgCa \times \frac{PMCaCO_3}{PaCa} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$Ca(mgCaCO_3) = 400,8mgCa \times \frac{100,08g / moldeCaCO_3}{40,08g / moldeCa}$$

$$mgCaCO_3 = 1000,8mg$$

$$\mu gCaCO_3 = 1,0008\mu g$$

Contenido de Calcio:

$$Ca(mg / L) = \frac{A \times B \times 400,8}{Vmuestra(mL)} \quad \text{Ec. (12)}$$

Contenido de Magnesio:

$$Mg(mg / L) = DurezaTotal(mgCaCO_3 / L) - DurezaCálcica(mgCaCO_3 / L) \times 0,244 \quad \text{Ec. (13)}$$

- Determinación la de la concentración de sólidos totales disueltos.

El residuo filtrable total para la determinación de los sólidos totales disueltos en el agua, se expresó en miligramos por litros (mg/L) y determinó mediante la siguiente relación:

$$ResiduoFiltrableTotal(mg / L)_{180^\circ C} = \frac{(A - B) \times 1000}{C} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

A = Masa del residuo secado + Masa de la cápsula (mg)

B = Masa de la cápsula (mg)

C = Volumen de la muestra evaporada (mL)

APÉNDICE C. Balance iónico de los resultados analíticos

$$Iones(meq/L) = Concentración(mg/L) / Peq$$

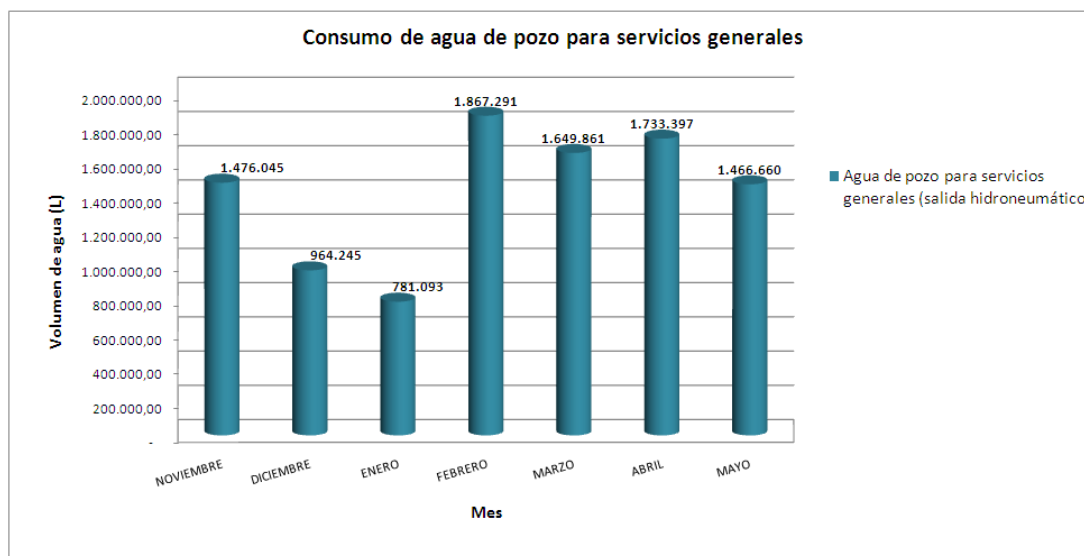
Donde:

Peq: Peso equivalente.

$$\%error = \frac{\sum cationes - \sum Aniones}{\sum cationes + \sum Aniones} \times 100$$

	Nov 2009	Dic 2009	Ene 2010	Feb 2009	Mar 2010	Abr 2010	May 2010	Jun 2010
Total Aniones (meq/L)	11,0	10,7	10,7	10,6	11,4	11,4	11,7	11,8
Cloruros (mg/L como Cl ⁻)	23	21	24	22	28	22	28	26
Fosfato (mg/L como PO ₄ ⁻³)	0,15	0,12	0,15	0,16	0,15	ND	0,1	0,13
Sulfato (mg/L como SO ₄ ⁻²)	165	134	126	159	145	173	187	177
Total Cationes (meq/L)	11,5	11,1	11,2	11,2	10,8	11,5	11,4	11,6
Sódio (mg/L como Na ⁺)	29	26	25	31	28	33	35	34
Magnesio (mg/L como Mg ⁺²)	11,3	11,6	11,3	10,9	10,4	11,0	9,92	11,20
Calcio (mg/L como Ca ⁺²)	186	181	184	179	170	184	173	188
Error (%)	2,3%	1,8%	2,4%	2,8%	3,6%	0,4%	3,3%	0,4%

APÉNDICE D. Gráfico de consumo de agua de pozo para servicios generales medido a la salida del hidroneumático.



APÉNDICE E. Simulación con el DEMO Programa ROSA.

Detalles del sistema

Detail Report

Detalles del Sistema

Caudal de Alimentación a la 1ª Etapa	73.36 gpm	Caudal de Permeado Paso 1	44.02 gpm	Presión Osmótica:	
Caudal de Agua Bruta al Sistema	62.88 gpm	Conversión Paso 1	70.00 %	Alimentación	2.51 psig
Presión de Alimentación	164.20 psig	Temperatura de Alimentación	25.0 C	Concentrado	8.00 psig
Fouling Factor	0.85	STD Alimentación	352.5 g mg/l	Media	5.26 psig
Dosificación Química (100%H2SO4)	0.00 mg/l	Número de Elementos	9	NDP media	144.7 g psig
Área Activa Total	3600.0 ft²	Flujo específico medio Paso 1	17.61 gfd	Potencia	6.55 kW
Clasificación del Agua: Agua de Pozo SDI < 3				Energía Específica	2.48 kWh/kgal

Etap	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (gpm)	Presión de Alimentación (psig)	Caudal de Recirculación (gpm)	Caudal de concentrado (gpm)	Presión del concentrado (psig)	Caudal de Permeado (gpm)	Flujo específico medio (gfd)	Presión de Permeado (psig)	Presión de Booster (psig)	STD Permeado (mg/l)
1	BW30-400	2	3	73.36	159.20	10.48	42.95	150.75	30.41	18.25	0.00	0.00	1.57
2	BW30-400	1	3	42.95	145.75	0.00	29.34	134.30	13.60	16.32	0.00	0.00	2.72

Corrientes Paso (mg/l como ión)									
Nombre	Alimentación	Alimentación ajustada		Concentrado		Permeado			
		Inicial	Después de recíolos	Etap 1	Etap 2	Etap 1	Etap 2	Total	
NH4	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	6.00	6.00		7.99	13.63	19.93	0.02	0.04	0.03
Ca	90.00	90.00		119.87	204.52	299.03	0.35	0.64	0.44
Sr	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	1.10	1.10		1.94	4.78	8.67	0.00	0.00	0.00
HCO3	188.00	188.00		249.42	422.52	614.28	0.95	1.58	1.14
NO3	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	10.00	62.47		83.21	141.97	207.58	0.23	0.43	0.29
F	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	5.00	5.00		6.66	11.37	16.63	0.01	0.02	0.02
SiO2	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boro	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	3.18	3.18		3.36	4.29	5.40	3.44	4.45	3.76
STD	300.11	352.58		469.11	798.82	1166.15	1.57	2.72	1.92
pH	7.90	7.90		7.98	8.08	8.12	5.67	5.77	5.71

APÉNDICE F. Descripción de alternativas propuestas

Comparación de alternativas

- Cálculo de la recuperación del concentrado (%)

% Recuperación = Caudal de concentrado a reutilizar (L/mes)/Caudal de concentrado generado por la ósmosis inversa (L/mes)

- Cálculo de confiabilidad operacional

Factor de servicio = número de días de operación al año / Número días totales al año.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Recuperación del concentrado (%)	30%	100%	100%
Calidad del agua	Conforme	Conforme	Conforme
Tiempo de implementación	1 mes 1/2	1 mes 1/2	2 meses
Confiabilidad operacional	98%	70%	85%
Costo de Inversión (BsF.)	40.690	39.139	65.495

Costo de inversión por alternativa

Estructura de costo	ALT 1 (BsF)	ALT 2 (BsF)	ALT 3 (BsF)
INGENIERÍA Y SUPERVISIÓN	3.151	2.521	5.041
PROCURA	17.538	17.118	29.021
Equipos	7.877	7.877	15.754
Tuberías y accesorios	7.140	6.720	8.226
Instrumentación	2.206	2.206	4.411
Electricidad	315	315	630
INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	20.001	19.501	31.433
Civil	236	236	473
Instalación de equipos	3.072	3.072	6.144
Instalación tuberías y accesorios	2.785	2.621	3.208
Instalación instrumentación	860	860	1.720
Instalación electricidad	123	123	246
Gastos de construcción	7.892	7.703	11.318
Contingencia	3.251	3.173	5.717
Utilidad de contratista	1.783	1.713	2.607
COSTO DE INVERSIÓN	40.690	39.139	65.495

Alternativa 1

Reúso del agua de concentrado para agua de riego

Equipos y materiales

- 2 Bombas de 2 hp: una (1) para la transferencia del agua de concentrado desde la salida del sistema de ósmosis hasta el tanque T-102 y una (1) para reemplazar la bomba existente P-103.
- 2 Válvulas de retención (check).

Instalar, construir y poner en operación

- Instalar una (1) bomba de succión en el tanque T-102 para reemplazar la bomba existente P-103, con su respectiva instalación de electricidad.

- Instalar una válvula de bloqueo en la línea de succión, aguas arriba del filtro y en las líneas de descarga de cada bomba.
- Instalar una válvula de retención (check) en la descarga de cada bomba.
- Instalar un instrumento de medición de nivel en el tanque T-102.
- Realizar prueba hidráulica y puesta en marcha asegurando confiabilidad operacional.
- 56 m de tubería galvanizada de 2 pulgada de diámetro y accesorios para puntos de enlace (Tie in).
- 1 instrumento de medición de nivel para el tanque.

Bomba P-105 y línea de transferencia

- Construir la fundación de la bomba P-105.
- Instalar una (1) bomba de transferencia P-105 de agua de concentrado a la salida del sistema de ósmosis inversa, con su respectiva instalación de electricidad. .
- Instalar una válvula de retención (check) en la descarga de cada bomba.
- Instalar una válvula de bloqueo en la línea de succión, aguas arriba del filtro y en las líneas de descarga de cada bomba.
- Realizar prueba hidráulica y puesta en marcha asegurando confiabilidad operacional.

Alternativa 2

Reúso del agua de concentrado para agua servicios generales

Equipos y materiales

- Bombas de 2 hp: una (1) para la transferencia del agua de concentrado desde la salida del sistema de ósmosis hasta el tanque T-102 y una (1) para reemplazar la bomba existente P-103.
- 1 Válvula de retención (check).

Instalar, construir y poner en operación

- Instalar una válvula de bloqueo en la línea de succión, aguas arriba del filtro y en las líneas de descarga de cada bomba.
- Instalar una válvula de retención (check) en la descarga de cada bomba.
- Realizar prueba hidráulica y puesta en marcha asegurando confiabilidad operacional.
- 56 m de tubería galvanizada de 2 pulgada de diámetro y accesorios para puntos de enlace (Tie in).

Bomba P-105 y línea de transferencia

- Construir la fundación de la bomba P-105.
- Instalar una (1) bomba de transferencia P-105 de agua de concentrado a la salida del sistema de ósmosis inversa, con su respectiva instalación de electricidad. .
- Instalar una válvula de retención (check) en la descarga de cada bomba.
- Instalar una válvula de bloqueo en la línea de succión, aguas arriba del filtro y en las líneas de descarga de cada bomba.
- Realizar prueba hidráulica y puesta en marcha asegurando confiabilidad operacional.

APÉNDICE G. Diagramas de flujo (DFP) de las alternativas de recuperación del concentrado.

P-101
Bomba de suministro de
agua de pozo

P-104
Bomba de suministro de
agua de pozo al sistema de
ósmosis inversa

T-103
Tanque de cloro

Tanque de almacenamiento
de agua para servicios
generales
V=250m3
Material: Concreto

X-101
Sistema de ósmosis
inversa

P-107
Bomba dosificadora de cloro

P-102
Bomba de
recirculación

P-105
Bomba de
recirculación de concentrado
de ósmosis inversa

Tanque de almacenamiento de
concentrado de ósmosis inversa
V=100m3
Material: Concreto

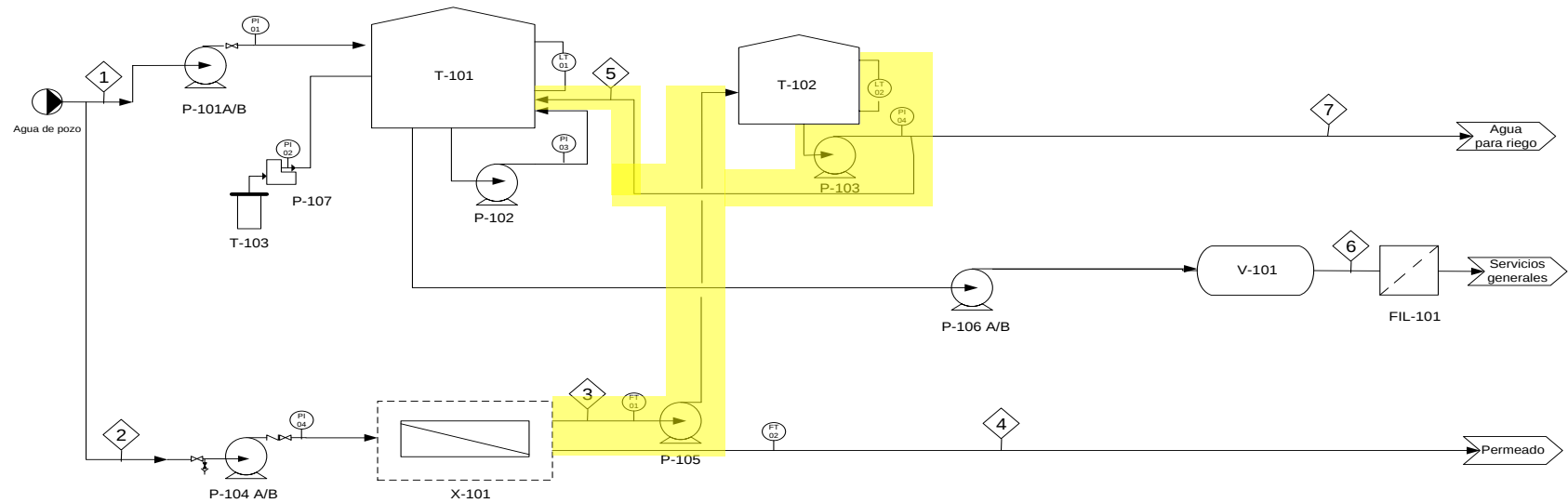
P-103
Bomba de riego

P-106/A/B
Bombas de
hidroneumático

V-101
Hidroneumático

FIL-101
Filtro de arena

A instalar



ALT-3 Reusó del concentrado para agua de servicios y agua de riego

Corriente		1	2	3	4	5	6	7
Flujo de agua (L/mes)	máx.	2.598.249	1.527.344	626.211	901.133	510.211	2.598.249	116.000
	min.	1.466.660	523.992	209.597	314.395	153.597	1.466.660	56.000

P-101
Bomba de suministro de
agua de pozo

P-104
Bomba de suministro de
agua de pozo al sistema de
ósmosis inversa

T-103
Tanque de cloro

Tanque de almacenamiento
de agua para servicios
generales
V=250m³
Material: Concreto

X-101
Sistema de ósmosis
inversa

P-107
Bomba dosificadora de cloro

P-102
Bomba de
recirculación

P-105
Bomba de
recirculación de concentrado
de ósmosis inversa

Tanque de almacenamiento de
concentrado de ósmosis inversa
V=100m³
Material: Concreto

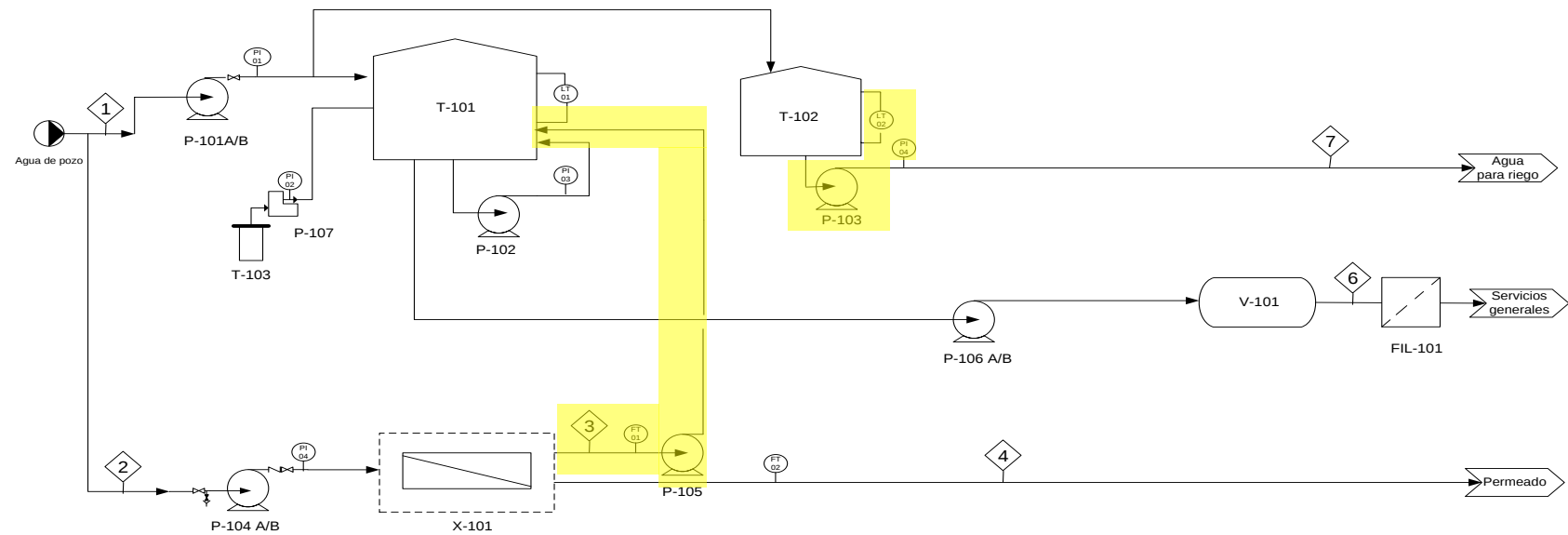
P-103
Bomba de riego

P-106/A/B
Bombas de
hidroneumático

V-101
Hidroneumático

FIL-101
Filtro de arena

■ A instalar



ALT-2 Reúso del concentrado para agua de servicios generales

APÉNDICE H. Aplicación del Método de decisión múltiple binaria (MDMB) para la evaluación de alternativas

- Definición de los criterios de decisión

A continuación se presenta los criterios de decisión establecidos para la evaluación de las alternativas propuestas

Criterios de decisión	
A	Maximización del uso de agua de concentrado
B	Maximización de la calidad del agua
C	Minimización del tiempo de implementación (construcción y operación)
D	Maximización de la confiabilidad operacional (factor de servicio, seguridad y mantenimiento)
E	Minimización de Costos de inversión (ingeniería, procura, instalación y puesta en operación)

- Matriz de comparación de los criterios de decisión

Para la obtención de los pesos de cada uno de los criterios se empleo la siguiente ecuación:

$$PC = (SP/ST) * 100 \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

PC: Peso del criterio

SP: sumatoria de los puntos obtenidos por determinado criterio

ST: sumatoria de la totalidad de los puntos.

$$PP = (4/10) * 100 = 40\%$$

	A	B	C	D	E	SP	PC (%)
A		1	1	1	1	4	40,00
B	0	-	0	0	1	1	10,00
C	0	0	-	0	1	1	10,00
D	1	0	1	-	1	3	30,00
E	0	0	1	0	-	1	10,00
ST						10	100,00

- Evaluación de alternativas por criterio

Matriz de puntuación de alternativa por criterio.

<u>CRITERIO A</u>	ALT 1	ALT 2	ALT 3	SP	Peso (%)
ALT 1	-	0	0	0	0,0
ALT 2	1	-	0	1	33,3
ALT 3	1	0	1	2	66,7
			ST	3	100,0
<u>CRITERIO B</u>	ALT 1	ALT 2	ALT 3	SP	Peso (%)
ALT 1		1	0	1	33,33
ALT 2	1	0	0	1	33,33
ALT 3	0	1		1	33,33
			ST	3	100,00
<u>CRITERIO C</u>	ALT 1	ALT 2	ALT 3	SP	Peso (%)
ALT 1		1	1	2	50,0
ALT 2	1	0	1	2	50,0
ALT 3	0	0	0	0	0,0
			ST	4	100,0
<u>CRITERIO D</u>	ALT 1	ALT 2	ALT 3	SP	Peso (%)

ALT 1				66,7	
	1	1	2		
ALT 2				0,0	
	0			0	
ALT 3				33,3	
	0	1	1		
				100,0	
	ST			3	
<u>CRITERIO E</u>	ALT 1	ALT 2	ALT 3	SP	Peso (%)
ALT 1				66,67	
	1	1	2		
ALT 2				33,33	
	0	1	1		
ALT 3				0,00	
	0	0	0		
				100,0	
	ST			3	

Matriz de evaluación final

Para la obtención de la puntuación parcial por alternativa en relación a cada criterio de evaluación se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{Puntuación parcial} = (\text{PA}/100) * \text{PP}$$

Donde:

PA= Peso de la alternativa i en función del parámetro

Criterios de evaluación	Peso (%)	ALT 1 (%)	ALT 2 (%)	ALT 3 (%)
A-Maximización uso del agua de concentrado	40,00	0	13,33	26,67
B-Maximización calidad del agua	10,00	3,33	3,33	3,33
C-Minimización tiempo de implementación	10,00	5,00	5,00	0,00
D-Maximización confiabilidad operacional	30,00	20,00	0,00	10,00
E-Minimización costo de inversión	10,00	6,67	3,33	0,00
Puntuación Final	100,0	35,0	25,0	40,00