



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN Y EL
CONTROL DE CRECIMIENTO DE LAS BACTERIAS RESPONSABLES DE LA
CORROSIÓN EN CAMPOS PETROLÍFEROS**

MARCO DANIEL RODRÍGUEZ MAYORGA

LEONARDO ANDRÉS VALBUENA LUNA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2014



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN Y EL
CONTROL DE CRECIMIENTO DE LAS BACTERIAS RESPONSABLES DE LA
CORROSIÓN EN CAMPOS PETROLÍFEROS**

MARCO DANIEL RODRÍGUEZ MAYORGA

LEONARDO ANDRÉS VALBUENA LUNA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

Director

LUIS FELIPE CARRILLO MORENO, M. Sc.

Codirector

HERNANDO BUENDÍA LOMBANA, M. Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

BUCARAMANGA

2014

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto de grado expresan sus sinceros agradecimientos a:

- M. Sc. Luis Felipe Carrillo Moreno, que asumiendo el rol de director de este proyecto, brindó su orientación y constante apoyo durante la realización del proyecto para lograr con éxito el objetivo planteado.
- La ingeniera Jenny Rodríguez del laboratorio de análisis petrofísicos y daño a la formación, por su valiosa colaboración y orientación durante el desarrollo del proyecto.
- El grupo de investigación de modelamiento de procesos hidrocarburos por permitirnos ser parte de éste y por permitirnos dar a conocer nuestro proyecto de grado.
- Ingrid Oviedo, por su gran ayuda en la comprensión de los procedimientos que hacen parte de las pruebas microbiológicas.
- El ingeniero y gran amigo Juan Carlos Lizcano, por su ayuda desinteresada en los lineamientos estructurales del documento.
- A todos nuestros amigos y seres queridos que estuvieron desde el principio con palabras de apoyo y aliento, y a todos aquellos que de alguna u otra manera colaboraron en lo que es hoy este documento final que presenta nuestro proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. CORROSIÓN INFLUENCIADA MICROBIOLÓGICAMENTE (MIC)	20
1.1. GENERALIDADES.....	20
1.2. BIOCORROSIÓN.....	21
1.2.1. Formación de la biopelícula	22
1.2.2. Efecto de los microorganismos.....	31
2. MÉTODOS DE DETECCIÓN, TRATAMIENTO Y MONITOREO DE LA MIC .	41
2.1. MÉTODOS DE DETECCIÓN.....	41
2.1.1. Métodos Microbiológicos	42
2.1.2. Métodos Bioquímicos.....	47
2.1.3. Métodos Moleculares.....	50
2.2. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LA MIC	51
2.2.1. Biocidas	51
2.2.2. Inhibidores de Corrosión.....	65
2.2.3. Otros Métodos	71
2.3. MÉTODOS DE MONITOREO	73
2.3.1. Métodos para Medir la Pérdida Física del Metal.....	73
2.3.2. Métodos para Medir las Propiedades Electroquímicas de las Superficies Corroídas	76
2.3.3. Otros Métodos	86
3. METODOLOGIA PARA LA DETECCIÓN Y EL CONTROL DE LA MIC EN CAMPOS PETROLÍFEROS.....	90

3.1.	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	91
3.2.	INSPECCIÓN VISUAL.....	93
3.3.	EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS.....	95
3.4.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	95
3.4.1.	Muestras Líquidas	96
3.4.2.	Muestras Sólidas	98
3.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	102
3.5.1.	Modelo de susceptibilidad al MIC	102
3.6.	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS.....	109
3.6.1.	Bacterias Reductoras de Sulfato (BSR).....	110
3.6.2.	Bacterias Depositadoras de Metales	114
3.6.3.	Bacterias Productoras de Ácido.....	116
3.7.	TRATAMIENTO	118
3.7.1.	Limpieza Mecánica	119
3.7.2.	Aplicación de Sustancias Químicas.....	121
3.8.	MONITOREO.....	127
4.	APLICACIÓN DEL MODELO DE SOOKNAH EN UN CAMPO COLOMBIANO.....	129
4.1.	DATOS DE LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	129
4.2.	ASIGNACIÓN DE FACTORES DE RIESGO (RF) Y DESARROLLO	129
4.3.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	133
5.	CONCLUSIONES.....	136
6.	RECOMENDACIONES	137
	BIBLIOGRAFIA.....	138



ANEXOS.....144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tubería severamente corroída debido a presencia de bacterias sulfato-reductoras (BSR).	21
Figura 2. Formación de la biopelícula.	22
Figura 3. Representación gráfica de la formación de una biopelícula en una tubería.....	23
Figura 4. Proceso de adhesión, crecimiento bacteriano, separación y dispersión de los microorganismos.	25
Figura 5. Esquema de desarrollo de una biopelícula.	26
Figura 6. Imagen de una biopelícula formada por bacterias sulfato reductoras (BSR) en la superficie de un metal, visualizada usando un SEM (Microscopía electrónica de barrido).	27
Figura 7. Crecimiento bacteriano vs Tiempo de exposición en distintas superficies.	29
Figura 8. Formación de zonas anódicas en la biopelícula.	31
Figura 9. Microfotografía de un grupo de bacterias filamentosas y bacilos.....	32
Figura 10. Reacciones de los tubérculos creados por las bacterias depositadoras de metales.	33
Figura 11. Depósitos de Manganeso sobre la superficie interna de una tubería. .	34
Figura 12. Perfil de concentración de sulfato respecto a la profundidad.....	36
Figura 13. Posición del sulfato, perfil de oxígeno y pH en el sistema.	37
Figura 14. Esquema general del proceso de biocorrosión por BSR en un acero al carbono en un ambiente anaeróbico.....	38
Figura 15. Microfotografía de esporas fúngicas en una superficie metálica.....	40
Figura 16. Detección de bacterias sulfato-reductoras (BSR) por medio del método del Anticuerpo Fluorescente (FA).	46
Figura 17. Estructura básica de membranas celulares.	54
Figura 18. Efecto del Glutaraldehído como biocida electrofílico.	59

Figura 19. Fórmula química de las isotiazolinonas	61
Figura 20. Fórmula Química del THPS	62
Figura 21. Curvas de polarización catódicas y anódicas en diagrama Potencial vs Corriente.	66
Figura 22. Efecto de los inhibidores Anódicos sobre las curvas de polarización. .	67
Figura 23. Mecanismo de protección de los inhibidores orgánicos.	69
Figura 24. Ejemplos de Cupones de Corrosión.....	74
Figura 25. Cambio en el potencial de corrosión debido a cambios en las reacciones anódicas y catódicas.	78
Figura 26. Circuito típico de conexión para el método de RPL.	79
Figura 27. Tipos de electrodos usados en la RPL.....	79
Figura 28. Ilustración de la RPL en una gráfica Potencial vs Corriente.	80
Figura 29. Electrodo Galvánico.	82
Figura 30. Circuito eléctrico equivalente.	83
Figura 31. Montaje típico para el análisis de ruido electroquímico.....	85
Figura 32. Imagen SEM de bacterias dentro de capas de sulfuro sobre la superficie de una aleación cobre-níquel (90/10).	87
Figura 33. Imagen TEM de Pseudomonas putida después de la remoción del exceso de humedad.....	89
Figura 34. Sistema de tratamiento de la MIC	92
Figura 35. Formación de cráteres en una pieza de acero al carbono.	94
Figura 36. Presencia de líneas en hendiduras paralelas al eje longitudinal de una pieza de acero al carbono.....	94
Figura 37. Procedimiento de toma de muestras mediante hisopos.....	101
Figura 38. Herramienta Excel para la solución del modelo de Sooknah.....	131
Figura 39. Datos de entrada de la herramienta.....	132
Figura 40. Esquema del desarrollo del análisis metagenómico.	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Biocidas oxidantes.....	58
Tabla 2. Principales biocidas y mezclas utilizadas en la industria.....	63
Tabla 3. Factores operacionales que disminuyen la efectividad de los biocidas...	64
Tabla 4. Composición de la Solución PBS	99
Tabla 5. Variables que afectan el crecimiento microbiano	104
Tabla 6. Variables que afectan el proceso de corrosión.....	106
Tabla 7. Factores de riesgo correspondientes a cada variable	108
Tabla 8. Valoración del riesgo o probabilidad de MIC	109
Tabla 9. Ingredientes del Medio de Lactato de Sodio para BSR	111
Tabla 10. Ingredientes del Medio Posgate B.....	112
Tabla 11. Número de bacterias reportadas de acuerdo al número de viales positivos.....	113
Tabla 12. Ingredientes del Medio de cultivo de Tioglicolato	114
Tabla 13. Ingredientes del Medio de nutrientes bacteriológicos estándar	115
Tabla 14. Composición del Medio Rojo de Fenol con Dextrosa	117
Tabla 15. Métodos de limpieza mecánica para diferentes superficies.....	120
Tabla 16. Pozos Muestreados	130
Tabla 17. Valoración del riesgo de MIC en los 10 pozos productores del campo	133
Tabla 18. Características de las muestras complejas	134

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE AGUA Y CONTENIDO DE METALES	144
ANEXO B. MATRIZ DE RIESGO PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DE SOOKNAH.....	147

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN Y EL CONTROL DE CRECIMIENTO DE LAS BACTERIAS RESPONSABLES DE LA CORROSIÓN EN CAMPOS PETROLÍFEROS*.

AUTORES: MARCO DANIEL RODRÍGUEZ MAYORGA, LEONARDO ANDRÉS VALBUENA LUNA**.

PALABRAS CLAVES: Corrosión Influenciada Microbiológicamente, MIC, Biocorrosión, Biopelícula, Bacterias, Detección, Tratamiento, Biocidas.

DESCRIPCIÓN:

La corrosión influenciada microbiológicamente, usualmente conocida como MIC, es uno de los problemas corrosivos que actualmente requieren de mayor atención en la industria del petróleo. Fenómeno asociado a interacciones de microorganismos y sus productos metabólicos con la superficie de los metales, no es sino hasta hace pocas décadas que se ha convertido en un tema de estudio e investigación para las diferentes industrias afectadas. La gran capacidad de supervivencia y adaptación de estos microorganismos, les permite colonizar ambientes con condiciones adversas como yacimientos petrolíferos y diversas aguas de formación, lo que supone un gran riesgo para los equipos y facilidades que se encuentran en superficie, así como para el medio ambiente y la vida humana.

El objetivo de este documento consistió en desarrollar una metodología de diagnóstico de la MIC y de detección y tratamiento de las bacterias responsables, basada en normas y procedimientos disponibles en la literatura, así como de una profunda revisión bibliográfica acerca de este fenómeno y los diversos métodos de detección y tratamiento existentes en la actualidad.

La metodología planteada por los autores integra diversas etapas que son requeridas para el adecuado tratamiento del problema (detección microbiológica, limpieza, tratamiento químico y monitoreo, entre otros), así como el planteamiento de un modelo de valoración preliminar de la MIC de fácil aplicación. El modelo fue validado en 10 pozos de un campo colombiano obteniendo resultados satisfactorios en la valoración del riesgo de corrosión microbiológica en comparación con datos experimentales.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director M.Sc. Luis Felipe Carrillo Moreno, Codirector M.Sc. Hernando Buendía Lombana.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETECTION AND CONTROL OF THE GROWTH OF BACTERIA RESPONSIBLE OF CORROSION IN OIL FIELDS*.

AUTHORS: MARCO DANIEL RODRÍGUEZ MAYORGA, LEONARDO ANDRÉS VALBUENA LUNA**.

KEYWORDS: Microbiologically Influenced Corrosion, MIC, Biocorrosion, Biofilm, Bacteria, Detection, Treatment, Biocides.

DESCRIPTION:

The microbiologically influenced corrosion, usually known as MIC, is one of the corrosion problems that currently require more attention in the oil industry. This phenomenon is associated to interactions of microorganisms and their metabolic products with metal surfaces and it wasn't until a few decades ago that it became a subject of study and investigation for all the affected industries. The great survival and adaptation capacity of this microorganisms, allows them to colonize environments with hostile conditions like oil reservoirs and formation waters, which poses a great risk not only for surface equipment and facilities, but also for the environment and the human life.

This document objective consisted in developing a MIC diagnosis and bacterial detection and treatment methodology, based on standards and procedures available in literature, as well as a deep bibliographic review on this phenomenon and the different methods existing for its detection and treatment nowadays.

The methodology proposed by the authors integrates several stages required for the proper treatment of the problem (microbiological detection, cleaning, chemical treatment and monitoring, among others), and the approach of an easy application model for preliminary assessment of MIC. This model was validated in 10 wells of a Colombian oilfield obtaining satisfactory results in the assessment of microbiological corrosion risk when compared with experimental data.

* Undergraduated Project

** Physic-chemist Engineering Faculty. Petroleum Engineering School, Director M.Sc. Luis Felipe Carrillo Moreno, Codirector M.Sc. Hernando Buendía Lombana.

INTRODUCCIÓN

Es sabido que la corrosión es uno de los principales problemas que han afectado al mundo industrializado desde sus etapas más tempranas de desarrollo. Proceso natural casi imposible de detener y observable desde la simple oxidación de piezas de joyería hasta el deterioro de grandes macroestructuras como buques y edificios, ha sido una de las causas de grandes pérdidas económicas y fallas técnicas en las industrias de petróleo y gas. Por este motivo, a través de los años diversas ramas de la ciencia y la ingeniería han dedicado sus esfuerzos con la intención de estudiar la naturaleza electroquímica de este fenómeno con el fin de poder desarrollar diversas técnicas y metodologías que puedan minimizar las consecuencias derivadas del mismo.

Sin embargo, muchas veces el simple análisis electroquímico no es suficiente para determinar las causas de la corrosión en un sistema evaluado. Sin la correcta detección del origen de este fenómeno, es ilógico pensar en la aplicación de procedimientos y técnicas que logren frenar el proceso de deterioro del material. Por este motivo, numerosos sistemas de control y protección contra la corrosión han fallado debido a la incorrecta interpretación del origen del fenómeno. No fue sino hasta hace pocas décadas que, en busca de encontrar explicaciones alternativas al origen de la corrosión, el estudio se llevó a un nivel más elemental, encontrando de esta manera la presencia de ciertos microorganismos en algunos sistemas con problemas corrosivos, dando lugar a un nuevo concepto en el estudio de este fenómeno. La corrosión influenciada microbiológicamente.

Las bacterias y otros microorganismos son conocidos por su gran capacidad de supervivencia bajo condiciones realmente extremas, condición que les permite estar en casi cualquier ambiente que se pueda imaginar. Más allá de esto, algunos yacimientos petrolíferos, debido a condiciones de temperatura y riqueza del agua

de formación, pueden ser propicios a la formación de ciertas bacterias u otros organismos que al subir a superficie tienden a adherirse a las superficies metálicas, principalmente tuberías, en donde forman complejos consorcios bacterianos que les permiten soportar los cambios generados en el ambiente. Algunas de estas bacterias tienen la capacidad de generar compuestos corrosivos como productos metabólicos que pueden generar una rápida corrosión del material en el que se encuentran, lo que supone un riesgo para los sistemas de superficie, sin mencionar las consecuencias ambientales y de salud humana que estos compuestos pueden provocar. Debido a esta característica casi omnipresente de estos microorganismos, se han documentado casos de MIC (siglas en inglés para “Corrosión Influenciada Microbiológicamente”) en industrias alimenticias, plantas químicas, industrias del papel, plantas de energía y, por supuesto, en sistemas de exploración, producción, transporte y almacenamiento de hidrocarburos.

El objetivo principal de este documento es el de plantear un esquema integral de aplicación en campo, que involucre la detección de los microorganismos responsables, la selección adecuada de los compuestos de tratamiento, así como un modelo que permita realizar una evaluación preliminar de las condiciones ambientales del sistema para determinar el riesgo o probabilidad de una corrosión por MIC.

En el Capítulo 1 se darán a conocer los conceptos básicos acerca de la corrosión influenciada microbiológicamente (MIC), los procesos químicos que involucra y aquellos microorganismos asociados a ésta.

En el segundo Capítulo se realizará una recopilación de los distintos métodos de detección microbiológica, de tratamiento y monitoreo de la MIC que actualmente están disponibles o se encuentran en fase de desarrollo.

El Capítulo 3 presenta el desarrollo metodológico de un esquema de tratamiento de la MIC planteado por los autores, que involucra diversas fases de desarrollo

(como evaluación ambiental, detección microbiológica, tratamiento, entre otros) para una correcta aplicación en campo. Durante esta sección se propone el uso de un modelo de evaluación ambiental con el fin de determinar de manera preliminar el riesgo o probabilidad de un sistema a presentar este tipo de corrosión.

Finalmente, en el Capítulo 4 se realiza una aplicación del modelo descrito en el capítulo anterior en un campo colombiano con el fin de evaluar su efectividad a la hora de dar un correcto diagnóstico preliminar siguiendo ciertas condiciones ambientales y es comparado con resultados experimentales que se llevaron a cabo en el mismo lugar.

1. CORROSIÓN INFLUENCIADA MICROBIOLÓGICAMENTE (MIC)

1.1. GENERALIDADES

La vida microscópica, aunque invisible al ojo humano, se encuentra presente en casi todos los ambientes acuosos existentes en el mundo. Desde ambientes marinos hasta fuentes de agua subterránea, allí una gran variedad de microorganismos conviven e interactúan entre sí de una manera casi simbiótica. Estos microorganismos, especialmente los de tipo bacteriano, son conocidos principalmente por su gran capacidad de adaptación y supervivencia en condiciones críticas, por lo que pueden encontrarse, incluso, en zonas de alta presión y temperatura como los yacimientos petrolíferos.

La corrosión influenciada microbiológicamente puede definirse como el proceso en el cual microorganismos intervienen directa, o indirectamente, en la cinética del proceso corrosivo de un material, causado por los productos metabólicos que éstos producen¹. Cuando el agua de formación entra en contacto con la superficie metálica, estos organismos se adhieren formando una película bacteriana, comúnmente conocida como biopelícula, generando productos corrosivos como parte de su proceso metabólico.

El efecto de este proceso suele resultar en la corrosión altamente localizada de la pieza metálica (Figura 1), agravada por la formación de zonas anódicas y catódicas no uniformes al interior de la película bacteriana, lo cual incrementa aún más la severidad y velocidad de la corrosión. Los microorganismos asociados a la MIC involucran diversos tipos de bacterias y hongos que contribuyen a la formación de condiciones óptimas de crecimiento de las primeras¹.

¹ BEECH; Iwona; BERGEL, Alain; MOLLICA, Alfonso; FLEMING, Hans-Curt; SCOTTO, Vittoria; SAND, Wolfgang. "Simple methods for the investigation of the role of biofilms in corrosion". Biofilms Publication, 2000.

Figura 1. Tubería severamente corroída debido a presencia de bacterias sulfato-reductoras (BSR).



Fuente: Tomado de DAVIS, J.R. "Corrosion Understanding the Basics", ASM International. Estados Unidos de América, 2000.

1.2. BIOCORROSIÓN

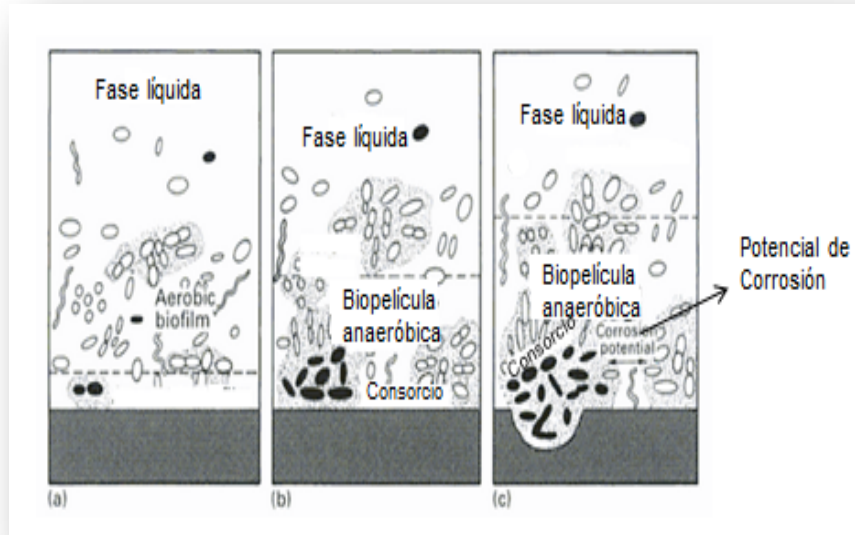
El término biocorrosión hace referencia al proceso corrosivo que se genera por la presencia de los microorganismos causantes de la MIC en la superficie metálica². Comúnmente usado como sinónimo, la biocorrosión es un proceso complejo pues a menudo se encuentra asociado a la interacción simbiótica de diversos tipos de microorganismos, sin embargo diversos estudios y análisis del fenómeno a través de los años, han llevado a la identificación de una serie de etapas³, representadas en la Figura 2:

² KEDDAM Michel. MONFORT, Nicolas. TRIBOLLET, Bernard "Detection and Mapping of SRB Influenced Corrosion of C-Steel". NACE International, Université P. et M. Curie, París – Francia, 2002.

³BORENSTEIN Susan W, "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Puplicing Ltd. Cambridge CB1 6AH, England, 1994.

- ✓ Las bacterias, al entrar en contacto con el metal, comienzan a adherirse formando una biopelícula.
- ✓ Estos microorganismos empiezan a formar colonias e interacciones complejas, generando compuestos corrosivos como producto de actividad metabólica.
- ✓ Estos productos corrosivos se acumulan en diferentes zonas de la biopelícula como formando celda electroquímica que termina en la corrosión localizada normalmente presentada en forma de *pits* o picadura.

Figura 2. Formación de la biopelícula.



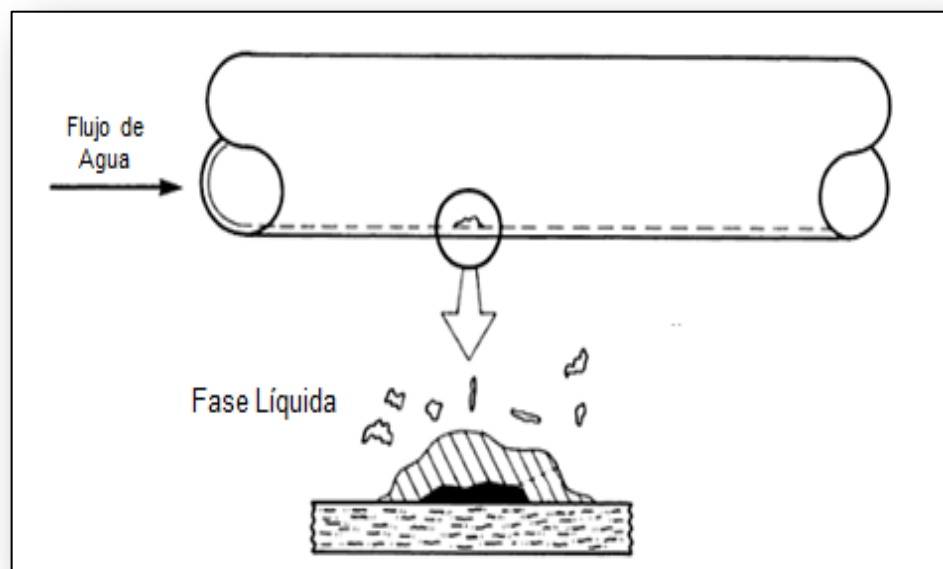
Fuente: Tomado y modificado de BORENSTEIN Susan W, "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Publishing Ltd. Cambridge CB1 6AH, England, 1994.

1.2.1. Formación de la biopelícula

Durante los primeros 200 años de desarrollo en el campo de la microbiología, los microorganismos fueron estrictamente estudiados en su forma aislada, es decir, analizados únicamente aquellos presentes de manera dispersa en el medio. No

fue sino hasta los años 70, gracias al gran desarrollo tecnológico del microscopio, que se descubrieron grandes interacciones simbióticas de diversas colonias bacterianas presentes en un mismo ecosistema⁴. El término de biopelícula nace por primera vez en estudios odontológicos, donde científicos analizaron microscópicamente colonias bacterianas adheridas en ciertas zonas de los dientes de la boca humana. Actualmente se sabe que aunque diversas bacterias pueden vivir en condiciones aisladas, éstas tienden a formar a aglomerarse como un medio de supervivencia que les permite resistir condiciones adversas, optimizar los recursos que el ambiente les proporciona e incluso resistir ataques químicos externos como ciertos agentes desinfectantes y biocidas (ver figura 3).

Figura 3. Representación gráfica de la formación de una biopelícula en una tubería.



Fuente: Tomado y modificado de BORENSTEIN Susan W, "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Publishing Ltd. Cambridge CB1 6AH, England, 1994.

⁴ ROBERGE, Pierre. "Handbook of Corrosion Engineering", McGraw-Hill. Martinsburg, 2000.

La formación de la biopelícula es, sin duda, un proceso crucial en el desarrollo de la MIC pues es allí donde se encuentra la mayor concentración de organismos vivos del sistema y donde se presenta la actividad más agresiva de éstos. El proceso ocurre debido a la capacidad de estos microorganismos de adherirse a las superficies formando colonias, por lo que estos consorcios bacterianos tienden a ser bastante heterogéneos, alterando la interacción entre el metal y el medio de manera compleja, lo que dificulta aplicar la definición ortodoxa de la corrosión inorgánica⁵.

La biopelícula puede definirse como una solución “mucosa” principalmente compuesta por agua (aproximadamente en un 95%), por una matriz cementante de sustancias poliméricas extracelulares (EPS), por elementos como metales pesados, y otras partículas inorgánicas atrapadas del ambiente. Este proceso comienza con la absorción de ciertas macromoléculas y/o materiales orgánicos presentes en la fase acuosa como proteínas, polisacáridos, ácidos grasos y lípidos que serán la materia prima para la formación de estos polímeros (EPS), que actuarán como el material cementante que proveerá la integridad estructural necesaria para su correcto desarrollo⁶. Hay que mencionar que en las primeras etapas de la biopelícula, se presenta una alteración en la mojabilidad de la superficie metálica, lo que facilita la posterior colonización de otras especies bacterianas. El resultado final es la formación de una estructura de entre 20 a 80 nanómetros aproximadamente, que se convertirá en el lugar de mayor actividad bacteriana y agresividad de la MIC⁴.

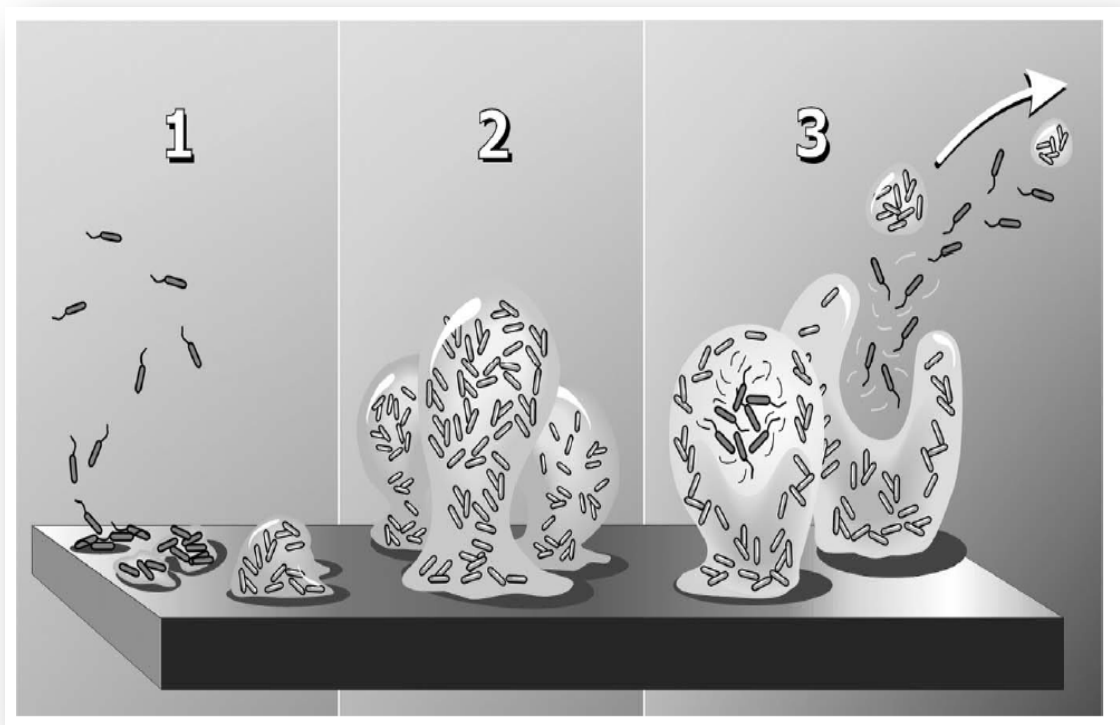
También es necesario resaltar que este ambiente interno es un sistema dinámico que involucra la adhesión, el crecimiento y la separación de comunidades bacterianas, por lo se pueden encontrar organismos tanto en el medio acuoso

⁵ VIDELA, H.A. HERRERA, L.K. “Studies in Surface Science and Catalysis” Publicado por Elsevier B.V. 2004.

⁶ WAGNER, Patricia A. RAY, Richard I. “Surface Analytical Techniques for Microbiologically Influenced Corrosion – A Review”, *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*, ASTM 1232, Jeffery R. Kearns and Brenda J. Little, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp 153-169.

(organismos planctónicos), como adheridos a la superficie (organismos sésiles)³. El proceso anterior es mostrado en la Figura 4:

Figura 4. Proceso de adhesión, crecimiento bacteriano, separación y dispersión de los microorganismos.

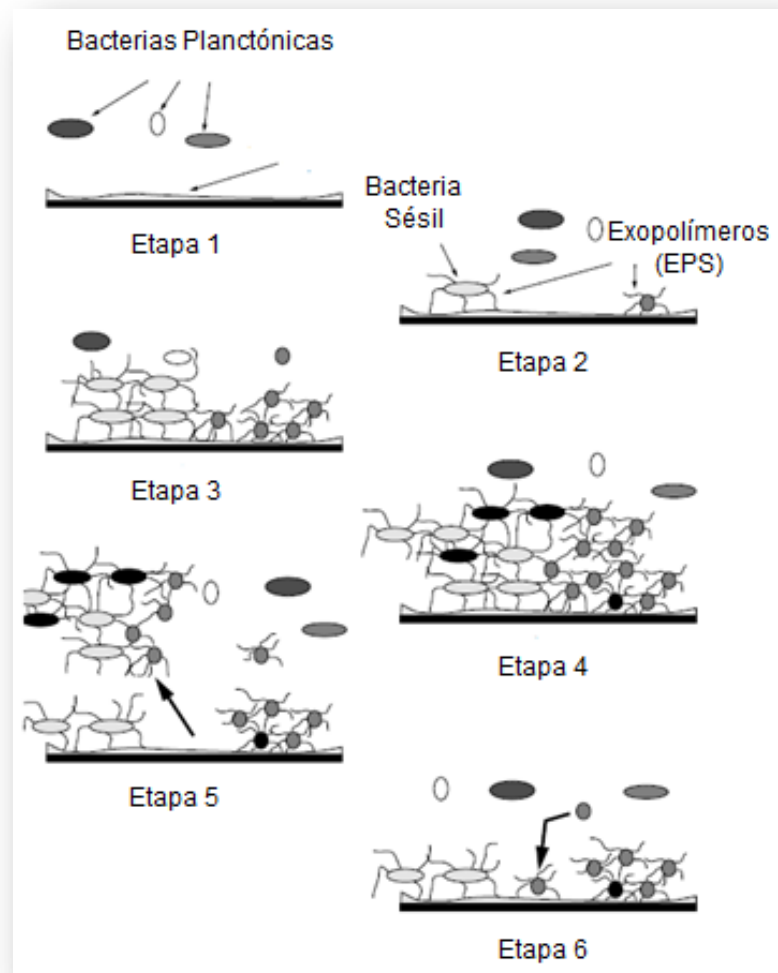


Fuente: Tomado de LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

Un análisis más detallado de este proceso, puede resultar en la identificación de varios pasos intermedios adicionales a los descritos en la figura anterior, como los expuestos por Borenstein (1994), que involucra: la migración de las primeras bacterias al metal y su acondicionamiento, la colonización de las bacterias planctónicas y producción de sustancias poliméricas extracelulares (EPS), la replicación y crecimiento de las bacterias adheridas (sésiles) en la superficie metálica, la formación y establecimiento de microcolonias de diversas especies, el

incremento en el espesor de la biopelícula y la separación de algunos organismos nuevamente a la fase acuosa (Figura 5).

Figura 5. Esquema de desarrollo de una biopelícula.



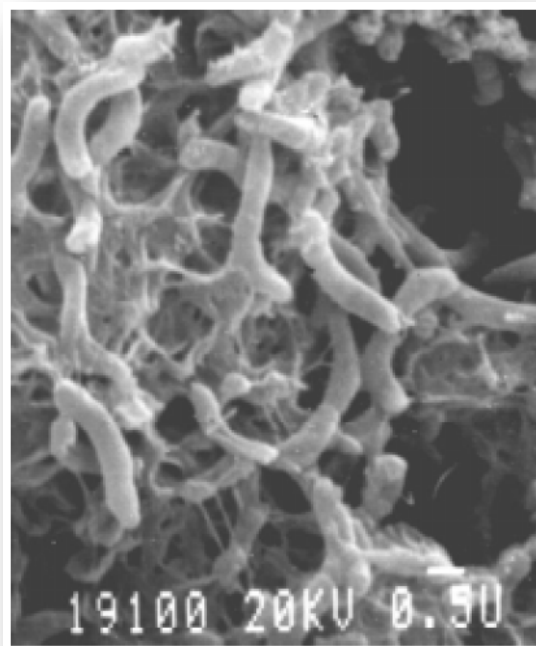
Fuente: Tomado y modificado de BORENSTEIN Susan W, "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Publishing Ltd. Cambridge CB1 6AH, England, 1994.

Así las cosas, puede notarse que este proceso es cambiante en el tiempo, en la medida que las características del sistema bacteriano no son las mismas y varían

a medida que este se desarrolla. Así, una biopelícula “madura” resulta ser más estable y difícil de remover que una que se encuentre en proceso de desarrollo⁷.

El resultado final concluye en un complejo ecosistema de crecimiento bacteriano que suele generarse tanto en lugares recónditos y de difícil acceso, como en superficies internas de tuberías y válvulas (Figura 6), lo que dificulta su temprana detección y tratamiento, por lo que sus agresivos y prolongados procesos corrosivos representan un gran peligro para las estructuras metálicas expuestas a éstas.

Figura 6. Imagen de una biopelícula formada por bacterias sulfato reductoras (BSR) en la superficie de un metal, visualizada usando un SEM (Microscopía electrónica de barrido).



Fuente: Tomado de BEECH, Iwona y GAYLARD, Christine: Recent Advances in the Study of Biocorrosion – An Overview. Porto Alegre: Revista de Microbiología, 1999.

⁷ ROBERGE, Pierre. “Handbook of Corrosion Engineering”, McGraw-Hill. Martinsburg, 2000.

Ambientes de formación

Se ha encontrado que la superficie de adhesión es un factor importante en la velocidad de formación de la biopelícula y en la cantidad de biomasa adherida, así como también en la distribución de ésta en la cara del material. Diversas pruebas de este tipo se han realizado indicando que el tipo de material juega un papel importante en la adhesión de las bacterias, especialmente en tiempos tempranos de exposición. Estudios realizados por Gerchakov et al (1977), analizan la influencia de distintos tipos de metales y otros materiales como el vidrio, en la cantidad de bacterias presentes en la biopelícula después de un cierto tiempo de exposición⁸, los resultados se encuentran graficados en la Figura 7.

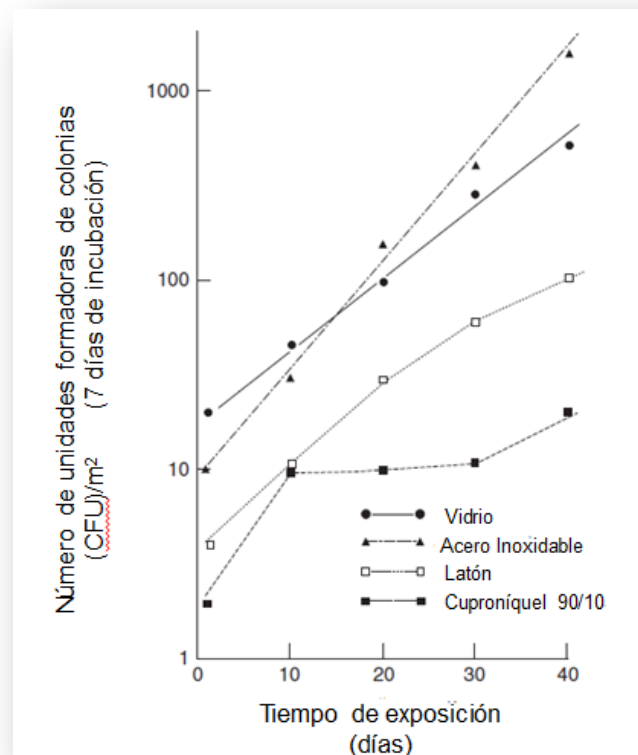
La Figura 7 nos indica, entonces, que elementos como el vidrio o el acero inoxidable presentan una mayor adhesión bacteriana que otro tipo de metales como el latón o el cuproníquel, conclusión que no resulta nada favorable para sistemas industriales incluida la industria petrolera. Se sabe que las condiciones fisicoquímicas del medio acuoso son también determinantes en el proceso de adhesión y formación de la biopelícula. La presencia de materia orgánica es vital para la formación de las EPS y, por consiguiente, para el desarrollo las aglomeraciones en la superficie. El carbono, presente en todos los sistemas acuosos, es el elemento principal que determina la velocidad de crecimiento de las bacterias que encuentran a éste como la fuente energética idónea para llevar a cabo sus procesos de reproducción y metabolismo. Se habla de una concentración promedio de entre 1 y 2 g/m³ en aguas destiladas, hasta un promedio de 150 g/m³ en aguas producidas en campos petroleros⁹. Las bacterias atrapadas en la biopelícula, donde existe menor escasez de nutrientes, son metabólicamente más activas, ayudando al desarrollo de una biomasa más densa

⁸ GERCHAKOV, SM. ROTH, FJ. SALLMAN, B. UDEY, LR, MARSZALEK, DS "Observations on microfouling applicable to OTEC systems". Gray H. Seattle, 1977.

⁹ LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

y estructuralmente estable¹⁰, por lo que la fuente de carbono afectará tanto la adhesión como la estructura de la misma. Estudios directos indican que en sistemas de baja cantidad de nutrientes, las biopelículas se forman como pequeños consorcios dispersos, mientras que a condiciones más favorables, se presenta como estructuras definidas y continuas.

Figura 7. Crecimiento bacteriano vs Tiempo de exposición en distintas superficies.



Fuente: Tomado y modificado de LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

Las concentraciones de fósforo y el nitrógeno también son importantes en el desarrollo y crecimiento bacteriano. Se ha observado que este crecimiento se ve

¹⁰ AZEREDO, J. OLIVEIRA, R. "The Role of Exopolymers in the Attachment of *Sphingomonas paucimobilis*". Centro de Engenharia Biológica-IBQF, Universidade do Minho, 4710-057. Braga-Portugal, 2000.

afectado en sistemas con presencia limitada de estas especies químicas (principalmente el último). Asimismo, se ha encontrado, también, una relación directa entre el espesor de la biopelícula con la relación carbón/nitrógeno⁸.

Finalmente, un factor como la temperatura puede aumentar o disminuir la cinética del proceso tanto de desarrollo de la biopelícula como en los procesos químicos y bioquímicos que allí se presentan.

Biocorrosión en la biopelícula

Los procesos químicos que ocurren al interior de una biopelícula son totalmente distintos a los que ocurren en el medio de solución acuosa. La biocorrosión al interior suele presentarse a distintos niveles, por lo que debe realizarse una caracterización “geográfica” de distintas zonas presentes allí, debido a que distintos tipos de bacterias precisan distintas condiciones ambientales para su subsistencia y desarrollo.

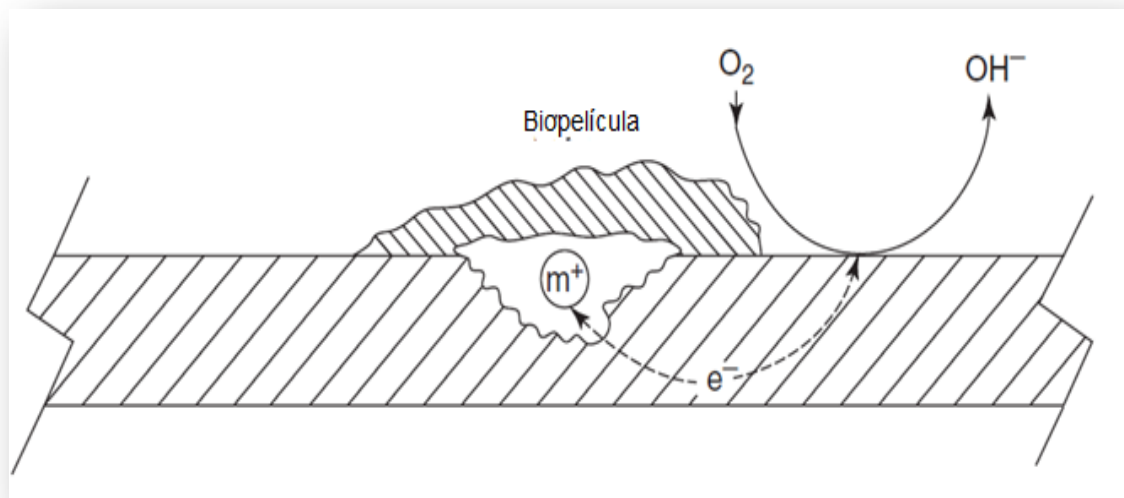
Es necesario, antes de esto, definir a la respiración bacteriana como un proceso de óxido-reducción en el cual se precisa de un aceptor de electrones para llevarse a cabo. Bajo esta clasificación, las bacterias pueden dividirse como aerobias o anaerobias, en donde estas últimas utilizan un aceptor de electrones diferente al oxígeno para llevar a cabo su proceso de respiración. Son precisamente este último tipo de bacterias las más agresivas y peligrosas cuando se habla de MIC, debido a que utilizan compuestos como el Sulfato (SO_4^-) u otros iones para llevar a cabo su respiración, generando productos corrosivos (sulfuro en este caso) como desechos metabólicos.

Es por lo anterior que al interior de la biopelícula se generan diversos nichos aeróbicos y anaeróbicos, presentándose diversas reacciones donde se producirá la corrosión. Estos nichos resultan en la conformación de celdas de aireación diferencial en donde aquellas zonas de respiración aerobia actuarán como zonas

catódicas y aquellas con concentraciones pequeñas o nulas de oxígeno, como zonas anódicas, favoreciendo así el proceso corrosivo¹¹.

Este fenómeno permite la convivencia de bacterias anaeróbicas como las Bacterias sulfato-reductoras (BSR), de las que se hablará más adelante, en medios aeróbicos como algunas aguas de producción.

Figura 8. Formación de zonas anódicas en la biopelícula.



Fuente: Tomado y modificado de LITTLE, BRENDA J. WAGNER, Patricia A. "Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, Houston-Texas, 1997.

1.2.2. Efecto de los microorganismos

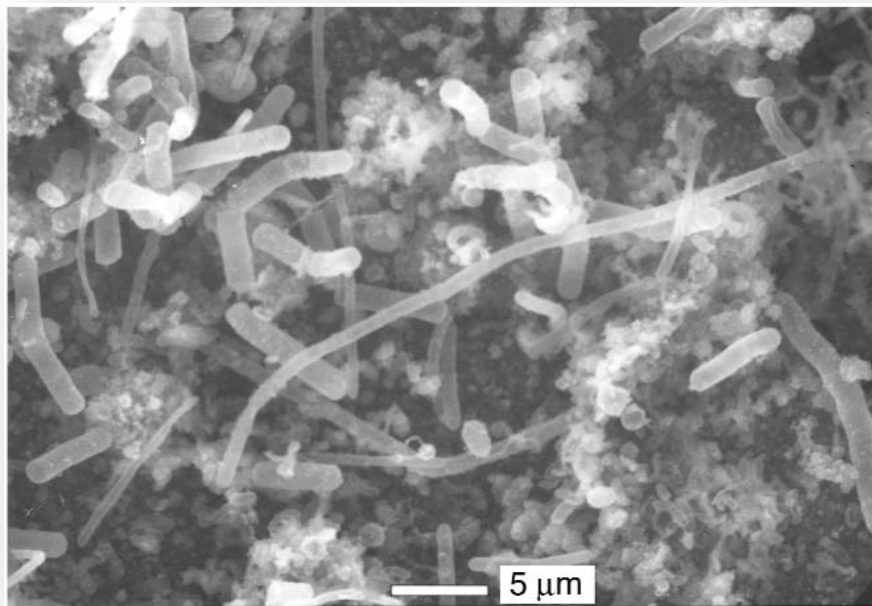
Aunque es importante estudiar las condiciones reales de interacción bacteriana en el proceso de MIC, es necesario observar cómo los diversos microorganismos contribuyen de manera aislada al proceso de corrosión que se genera en la biopelícula. Por esta razón es necesario realizar un estudio individual y más detallado de los principales microorganismos causantes de la MIC.

¹¹ LITTLE, BRENDA J. WAGNER, Patricia A. "Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, Houston-Texas, 1997.

Bacterias

Las bacterias son organismos procariotas unicelulares que pueden estar presentes en el medio individualmente, o formando colonias dentro de la biopelícula (Figura 9). Sus tamaños varían entre 1 a 10 μm de longitud y 0,2 a 5 μm de espesor, además toleran un amplio rango de condiciones ambientales, incluyendo temperaturas entre los 32°F (0°C) a los 210°F (99°C) y pH desde 0 hasta 12. Motivo por el cual pueden estar presentes en ambientes realmente extremos.

Figura 9. Microfotografía de un grupo de bacterias filamentosas y bacilos.



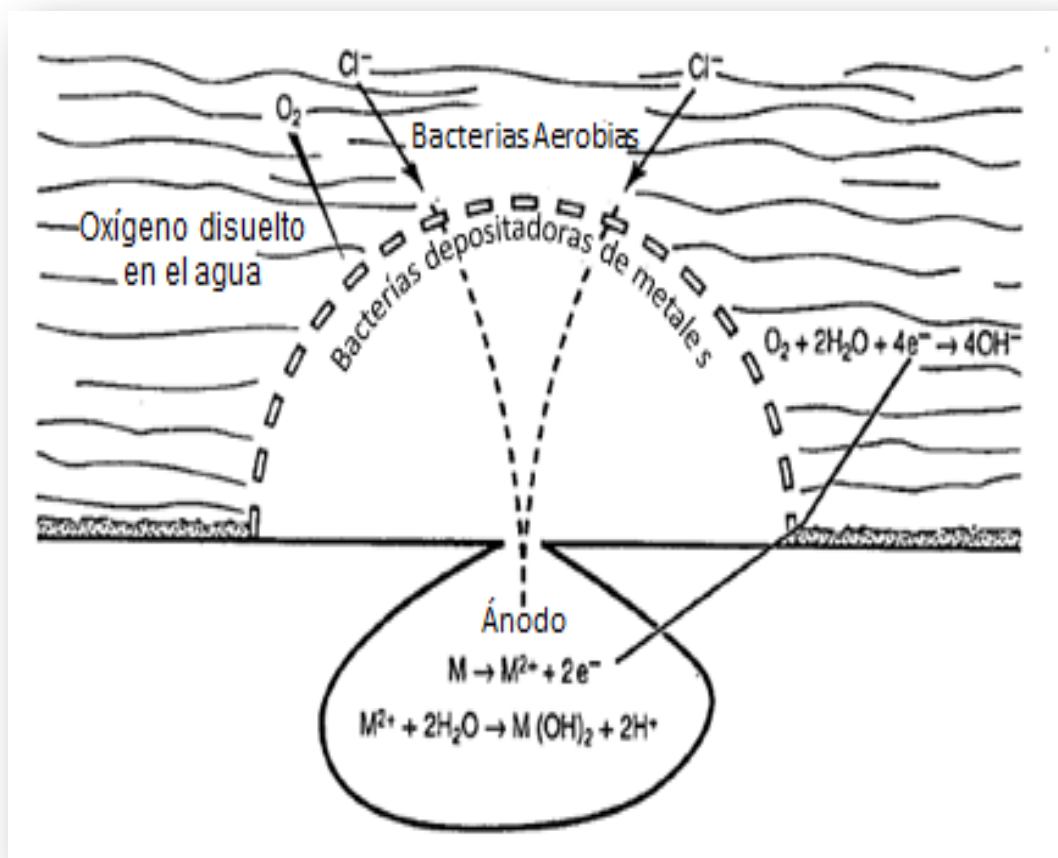
Fuente: Tomado de LITTLE, Brenda y LEE, Jason: Microbiologically Influenced Corrosion. New Jersey: Wiley & Sons Inc., 2007.

Bacterias Depositadoras de Metales (BDM)

Uno de los principales tipos de bacterias, presentes en la mayoría de problemas asociados a la MIC, son las bacterias depositadoras de metales (BDM). La principal característica de este tipo de organismos es la de generar depósitos

metálicos bajo la superficie del material, bajo los cuales se forman fácilmente celdas de concentración de metales, fenómeno que aumenta drásticamente el potencial de corrosión y la heterogeneidad de la misma, como se muestra en la Figura 10. Es preciso mencionar que este tipo de bacterias están altamente relacionadas con la corrosión por picadura¹².

Figura 10. Reacciones de los tubérculos creados por las bacterias depositadoras de metales.



Fuente: Tomado y modificado de LITTLE, BRENDA J. WAGNER, Patricia A. "Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, Houston-Texas, 1997.

¹² BEECH, Iwona y GAYLARD, Christine: Recent Advances in the Study of Biocorrosion – An Overview. Porto Alegre: Revista de Microbiologia, 1999.

Además, existen algunos organismos que simplemente se encargan de acumular hierro o manganeso sin oxidarlo, contribuyendo a la creación de una biopelícula rica en metales como la mostrada en la Figura 11 que, al reaccionar con los algunos iones presentes en aguas de producción como el hipoclorito, crean componentes altamente corrosivos perjudiciales para las tuberías.⁹

Figura 11. Depósitos de Manganeso sobre la superficie interna de una tubería.



Fuente: Tomado de LITTLE, Brenda y LEE, Jason: Microbiologically Influenced Corrosion. New Jersey: Wiley & Sons Inc., 2007.

Bacterias Productoras de Ácidos Orgánicos (APB)

Son organismos bastante agresivos debido a su capacidad de producir grandes cantidades de ácidos orgánicos como lo son el ácido acético, el ácido láctico y el ácido fórmico; productos metabólicos de estas bacterias que, lógicamente, atacarán directamente la pieza metálica promoviendo una oxidación electroquímica que terminará en la corrosión de la misma. Estos productos suelen estar altamente concentrados pues tienden a producirse al interior de la biopelícula, además de servir como fuente de carbono para otros tipos de microorganismos.^{10 11}

Bacterias reductoras de metales

Este tipo de bacterias son conocidas por promover la corrosión de diversos metales a través de la disolución de las películas de óxido que estos poseen y que los protegen de la corrosión. Resultando generalmente en la pérdida permanente de dichas películas protectoras o, en algunos casos, en el reemplazo por otras menos estables que permiten la ocurrencia de los procesos de corrosión. Si bien este tipo de bacterias no son causantes directas del fenómeno del MIC, sí favorecen que este proceso ocurra, por lo que en presencia otras bacterias, pueden contribuir en gran medida a aumentar las velocidades de la corrosión.¹¹

Bacterias productoras de limos

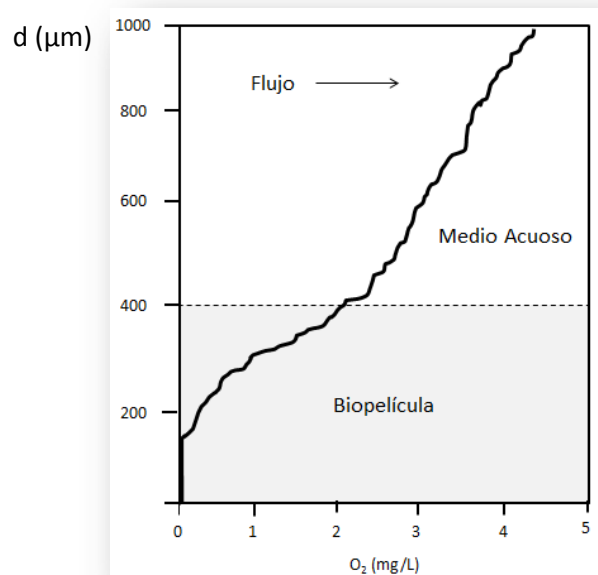
Son un conjunto de bacterias, con la capacidad de producir polímeros extracelulares que crean lo que comúnmente se conoce como “limo”. Este polímero es, de hecho, una red sofisticada de “hilos pegajosos” que fijan las células a la superficie de los materiales y atrapan todo tipo de partículas que flotan en el medio que, en última instancia, controlarán la permeabilidad del depósito. Los limos son excelentes filtros de oxígeno toda vez que previenen que éste alcance la parte subyacente de la capa, creando un ambiente ideal para el crecimiento de las BSR y las APB convirtiendo en un pequeño ánodo la superficie bajo los depósitos (en comparación con el gran cátodo oxigenado que la rodea). La corrosión en el ánodo produce iones metálicos que se hidrolizan y disminuyen el pH. Además, iones como el Cl^- migran al ánodo para neutralizar cualquier acumulación de carga formando cloruros metálicos que son extremadamente corrosivos (Little et al., 1997).

Otro factor a tomar en cuenta es que varios tipos de enzimas pueden encontrarse dentro de la masa polimérica por fuera de las celdas bacterianas y que algunas de estas son capaces de interceptar y degradar sustancias tóxicas (como biocidas e inhibidores), convirtiéndolas en nutrientes para las bacterias y otros microorganismos presentes.

Bacterias reductoras de sulfato (BSR)

Por último, las bacterias tal vez más estudiadas, más analizadas e íntimamente ligadas a la MIC, son las bacterias sulfato-reductoras (BSR), las cuales están presentes en prácticamente todos los sistemas donde ocurre este tipo de corrosión llegando al extremo de ser de ser fuente de desarrollo de grandes trabajos y libros acerca de su comportamiento e influencia en la MIC^{10 11 13}. Estas bacterias, capaces de reducir el sulfato (presente en el medio) a iones sulfuro, son organismos altamente agresivos, responsables de una corrosión altamente localizada debido a que, por su condición anaeróbica, se encuentran en la parte más baja de la biopelícula donde la cantidad de oxígeno es prácticamente cero (Figuras 12 y 13).

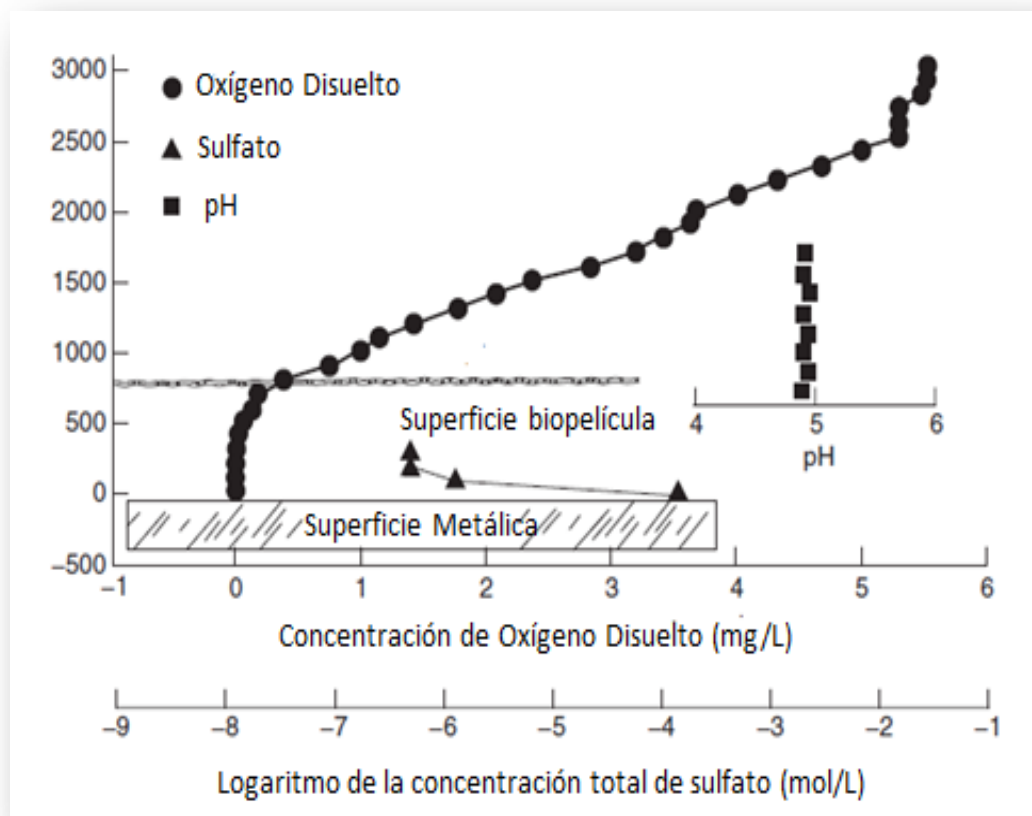
Figura 12. Perfil de concentración de sulfato respecto a la profundidad.



Fuente: Tomado y modificado de HEITZ, E. FLEMMING, H. C. SAND, W
“Microbially Influenced Corrosion of Materials” Springer, Berlín, 1996.

¹³ ROBERGE, Pierre. “Handbook of Corrosion Engineering”, McGraw-Hill. Martinsburg, 2000.

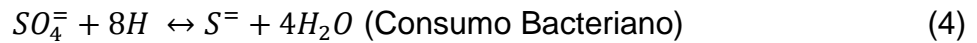
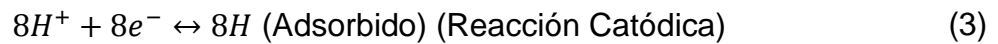
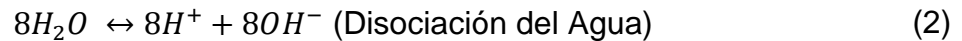
Figura 13. Posición del sulfato, perfil de oxígeno y pH en el sistema.



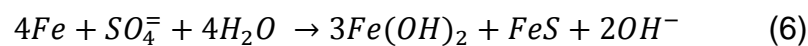
Fuente: LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

Los efectos que producen sobre los materiales han sido investigados durante muchas décadas, y desde que se comprobó la relación entre las BSR y la MIC, varias teorías se han planteado con el fin de explicar los métodos por los cuales éstas pueden alterar las condiciones electroquímicas de los metales¹⁴. Una de las más aceptadas es aquella propuesta por Von Wolzogen Kuhr y Van Der Vlugt (1934) la cual sugiere una serie de reacciones como una demostración inicial de la MIC por BSR:

¹⁴ BEECH, Iwona y GAYLARD, Christine: Recent Advances in the Study of Biocorrosion – An Overview. Porto Alegre: Revista de Microbiologia, 1999.

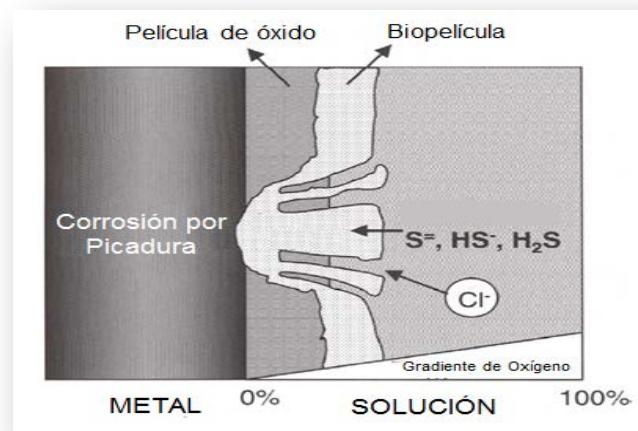


Ahora, la reacción general puede resumirse de la siguiente manera¹⁵:



El resultado final de estos procesos dentro de las biopelículas, es la generación de una gran cantidad de sitios sobre la superficie metálica fisicoquímicamente distintos a las áreas a su alrededor, lo que facilita la iniciación de procesos de corrosión localizada como se representa en la figura 14.

Figura 14. Esquema general del proceso de biocorrosión por BSR en un acero al carbono en un ambiente anaeróbico.



Fuente: Tomado y modificado de VIDELA, H.A. HERRERA, L.K. "Studies in Surface Science and Catalysis" Publicado por Elsevier B.V. 2004.

¹⁵ VIDELA, H.A. HERRERA, L.K. "Studies in Surface Science and Catalysis" Publicado por Elsevier B.V. 2004.

Generalmente las BSR requieren de un ambiente altamente reducido y con completa ausencia de oxígeno para realizar sus funciones eficientemente, por esta razón son consideradas como organismos estrictamente anaeróbicos, aunque diversos estudios han demostrado que pueden sobrevivir bajo condiciones aerobias¹⁶, e incluso, a muy bajas concentraciones de oxígeno disuelto algunas especies son capaces de respirar con Fe^{3+} u oxígeno utilizando el hidrógeno como donador de electrones.¹⁷

Hongos

Los hongos presentes en ambientes relacionados a la MIC pueden ser distribuidos en dos grupos principales: levaduras y mohos. Las levaduras son organismos unicelulares que se reproducen generalmente por gemación (tipo especial de mitosis) y algunos casos mediante la formación de esporas fúngicas (ver figura 15). Su importancia en la corrosión de metales es mínima ya que raramente se encuentran en grandes números en la mayoría de ambientes acuáticos.

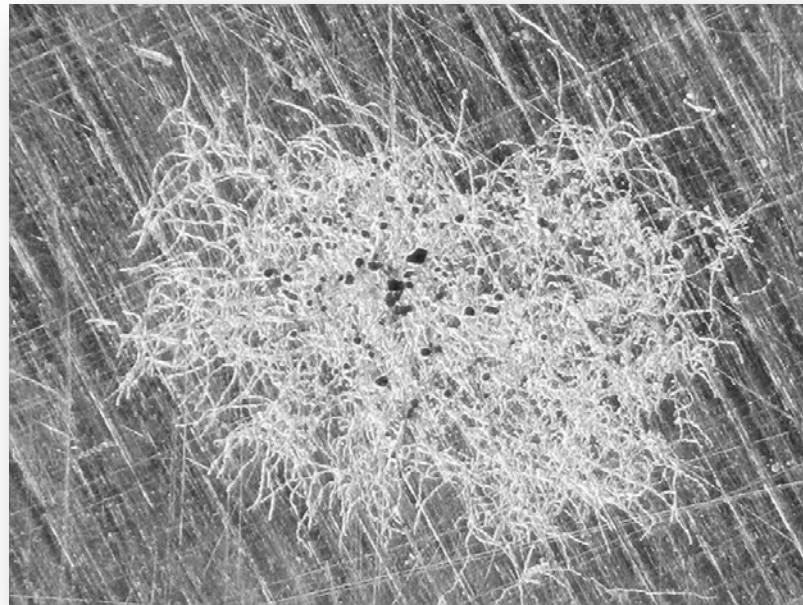
Los mohos son organismos no fotosintéticos que requieren oxígeno y elementos orgánicos para su crecimiento. Son nutricionalmente diversos, es decir, pueden usar una gran variedad de componentes como fuente de alimentación. El rango de temperaturas para su crecimiento está entre los 32°F y los 140°F, y el rango de pH está entre 2 y 8.

Entre sus métodos de reproducción encontramos la división celular, la fragmentación y la formación de esporas. Aunque el suelo es su hábitat más común de este tipo de microorganismos, varios grupos fúngicos se desarrollan en ambientes acuáticos.

¹⁶ WARGIN, Alina; OLAŃCZUK-NEYMAN, Krystyna y SKUCHA, Monika: Sulphate-Reducing Bacteria, Their Properties and Methods of Elimination from Groundwater. Gdansk: Polish Journal of Environmental Studies.

¹⁷ RODEN, Erick y LOVELY, Derek: Dissimilatory Fe(III) Reduction by the Marine Microorganism Desulfuromonas Acetoxidans. Applied and Environmental Microbiology, 1993.

Figura 15. Microfotografía de esporas fúngicas en una superficie metálica.



Fuente: Tomado de LITTLE, Brenda y LEE, Jason: Microbiologically Influenced Corrosion. New Jersey: Wiley & Sons Inc., 2007.

Los hongos, asimilan material orgánico y desarrollan subproductos potencialmente agresivos, especialmente ácidos orgánicos, entre los que se encuentran el ácido oxálico, el ácido láctico, el ácido acético y el ácido cítrico, los cuales reducen el pH del medio y aumentan la velocidad de corrosión en las tuberías. Además, generan grandes cantidades de polímeros, que empeoran los problemas de depositación y pueden ocasionar procesos de corrosión por grietas en los materiales¹⁸.

Por último, algunas especies (como la *H. resiniae*) tienen la capacidad de descomponer polímeros complejos, como los que conforman el petróleo, produciendo nutrientes que sirven de alimento a otros organismos asociados al MIC.

¹⁸ GAYLARD, Christine; BENTO, Fatima; KELLEY, Joan: Microbial Contamination of Stored Hydrocarbon Fuels and its Control. Porto Alegre: Revista de Microbiologia, 1999.

2. MÉTODOS DE DETECCIÓN, TRATAMIENTO Y MONITOREO DE LA MIC

La MIC es un tema que genera mucha preocupación en la industria de los hidrocarburos debido a los impactos económicos que esta genera (se estima que las pérdidas generadas anualmente ascienden a los cientos de millones de dólares)¹⁹; por esta razón su detección, tratamiento y monitoreo son procesos muy importantes, puesto que su correcta aplicación permite no solo corregir las fallas causadas por la corrosión microbiológica, sino también ahorrar costos al prevenir daños que podrían ocurrir sobre los equipos. La omisión arbitraria de alguno de estos pasos no es recomendable por ningún caso puesto que, por ejemplo, resumir la operación de un sistema con fallas sin primero determinar su origen lleva generalmente al gasto de grandes capitales debido a la reaparición de estas fallas.

En este capítulo se discuten métodos para detectar, tratar y monitorear problemas asociados a la MIC. Estos métodos incluyen el monitoreo de parámetros operacionales y condiciones del sistema, así como el uso de técnicas de inspección no destructivas para obtener información microbiológica, química y metalúrgica, y varias técnicas de mitigación de la biocorrosión basadas en la eliminación de microorganismos o en la alteración de los procesos electroquímicos causantes de corrosión.

2.1. MÉTODOS DE DETECCIÓN

La detección constituye el primer paso a realizar para diagnosticar si un proceso corrosivo es causado por microorganismos o no. A lo largo de los años diversas técnicas se han desarrollado que permiten realizar identificaciones y cuantificaciones detalladas de especies microbianas específicas, y cuyos

¹⁹ SOOKNAH, Reeta; PAPA VINASAM, Sankara; REVIE, Winston. "Monitoring Microbiologically Influenced Corrosion: A Review of Techniques". Ottawa, NACE International, 2007.

funcionamientos están basados en criterios como la presencia de reacciones químicas determinadas o la medición de ciertos compuestos químicos.

La selección del método de detección adecuado depende de diversos factores como el tipo de microorganismos que se desea evaluar, así como los costos y el tiempo disponible para realizar las pruebas, y de acuerdo a esto, ciertas técnicas presentarán mejores resultados que otras; no obstante, hay que tener en cuenta que pueden presentarse casos en los que la MIC no esté directamente relacionada con la presencia de los microorganismos que están siendo evaluados, por lo que se recomienda realizar un programa de detección completo, que implique el uso de varias metodologías de detección.

2.1.1. Métodos Microbiológicos

Los métodos microbiológicos permiten determinar qué tipos de organismos están presentes en las muestras mediante métodos diversos, y se caracterizan porque están basados en técnicas clásicas de aislamiento y caracterización de especies patogénicas usadas en el estudio de enfermedades infecciosas.

Técnicas de Cultivo

Determinan y cuantifican la presencia de microorganismos comúnmente asociados a la MIC mediante el método de diluciones seriales que se basan en la inyección consecutiva de un inóculo (muestra líquida o sólida) en un arreglo de envases contenedores llenos con un medio de cultivo preparado específicamente para fomentar el crecimiento de cada tipo. En estas pruebas, dicho crecimiento microbiano es detectado de forma visual como un aumento en la turbidez del medio o la ocurrencia de una reacción química en este.

Durante muchos años, debido al poco conocimiento que se tenía sobre los mecanismos de la MIC y los organismos causantes, la detección se limitó a las bacterias sulfato-reductoras usando medios de cultivo con lactato como única

fuelle de carbono^{20 21} (la aparición de depósitos de color negro de sulfuro de hierro, provenientes de la reacción del hierro en solución con el sulfuro originado por la reducción del sulfato confirmaba su presencia); sin embargo las tendencias actuales apuntan hacia la generación de medios de cultivo capaces de mantener el crecimiento de grupos fisiológicamente diversos y alcanzar un mayor número de organismos en menores tiempos²².

La principal ventaja de las técnicas de cultivo radica en su sensibilidad, ya que un bajo número de microorganismos puede crecer a niveles fácilmente detectables si se encuentra en el medio adecuado; sin embargo, existen diversos problemas asociados. Varias investigaciones han demostrado que el tipo de almacenamiento de las muestras y su manejo antes de la evaluación pueden provocar cambios en la población bacteriana²³.

Además se ha comprobado que en la totalidad de los casos las técnicas de cultivo subestiman el número de organismos en una población natural, y se ha encontrado que el 99% de los microorganismos se resisten a ser cultivados en laboratorio. Otras complicaciones incluyen la dificultad de los medios de cultivo para simular la complejidad de los ambientes naturales, y la preferencia de estos hacia determinados tipos microbianos.

La presencia de bioincrustaciones y de acumulaciones de BSR sobre la superficie de los materiales también pueden entorpecer los procesos de conteo²², ya que estos son más adecuados para la enumeración cuantitativa de bacterias planctónicas.

²⁰ POSTGATE, John: The Sulphate-Reducing Bacteria. Great Britain: Cambridge University Press, 1979.

²¹ American Petroleum Institute: API Recommended Practice for Biological Analysis of Subsurface Injection Waters. New York: API, 1965.

²² SORACCO, Reginald; POPE, Daniel; EGGARS, J. M.; EFFINGER, Tom: Microbiologically Influenced Corrosion Investigations in Electric Power Generation Stations. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1988.

²³ TUOVINEN, Olli. CRAGNOLINO, Gustavo. "A Review of Microbiological and Electrochemical Techniques in the Study of Corrosion Induced by Sulfate-Reducing Bacteria". ASTM International, Philadelphia, 1986.

Número Más Probable (NMP)

La técnica del número más probable (NMP) es una de las herramientas más eficientes y sencillas aplicadas en la actualidad, la cual permite calcular densidades poblacionales de microorganismos vivos y metabólicamente activos. Generalmente se emplea después de realizar diluciones seriales a un cultivo y sus estimaciones están basadas en la suposición de que los microorganismos se distribuyen de forma aleatoria en el medio líquido, y que por lo tanto, muestras repetidas, del mismo tamaño y provenientes de la misma fuente tendrán, en promedio, la misma cantidad de organismos.²⁴

Este método se basa en una teoría de probabilidad estadística, que asume que cualquier organismo presente en la muestra crecerá en el medio y se distribuirá de manera aleatoria, por lo que es posible desarrollar ecuaciones generales y tablas estándar para encontrar el número de microorganismos presentes en 100 mL de muestra para varias combinaciones de tubos con actividad bacteriana observada, lo que lo hace un método bastante sencillo y relativamente preciso para cuantificar poblaciones bacterianas.

La precisión de este proceso aumenta si se usa un número mayor de tubos evaluados, por esta razón, si no se tiene un aproximado de la población microbiana total, se aconseja usar por lo menos cinco tubos con una dilución de 1:10. Es importante aclarar que las tablas y ecuaciones encontradas en la literatura solo aplican para ciertas condiciones específicas; consecuentemente, es recomendable consultar alguna referencia antes de realizar las diluciones.

Microscopía de Epifluorescencia

Es uno de los métodos más utilizados en el conteo directo de bacterias asociadas a la MIC. El principio se basa en el uso de tintes fluorescentes, como la naranja de acridina o el 4,6-diamidino-2-fenilindol (DAPI), que buscan teñir el material

²⁴ LITTLE, Brenda y WAGNER, Patricia: Microbiologically Influenced Corrosion. Houston: NACE International, 1997.

biológico presente en la muestra para su posterior conteo mediante el uso de un microscopio de fluorescencia. La aplicación de estos métodos requiere cierto grado de experiencia del operador a la hora de distinguir las bacterias iluminadas de otros cuerpos fluorescentes²⁵, además de la necesidad de que por lo menos existan 10³ microorganismos por mililitro para arrojar una medición confiable del total de población microbiana²⁶.

La efectividad de estos métodos puede ser mejorada mediante el uso de anticuerpos que identifiquen específicamente el tipo de bacteria que se está enumerando.

Método del Anticuerpo Fluorescente (FA)

Este método se basa en el uso de anticuerpos generados a partir de la respuesta inmune de ciertos animales a la presencia de agentes microbianos en su torrente sanguíneo. Estos anticuerpos interactuarán con un organismo en específico que se encuentre presente en una muestra de campo, por lo que es efectivo en muestras de poblaciones mixtas, emulsiones aceitosas, e incluso en muestras de suelo²⁷, proporcionando una mejor percepción de la locación, tasa de crecimiento y actividad de grupos específicos de organismos en una biopelícula (Roberge, 2000).

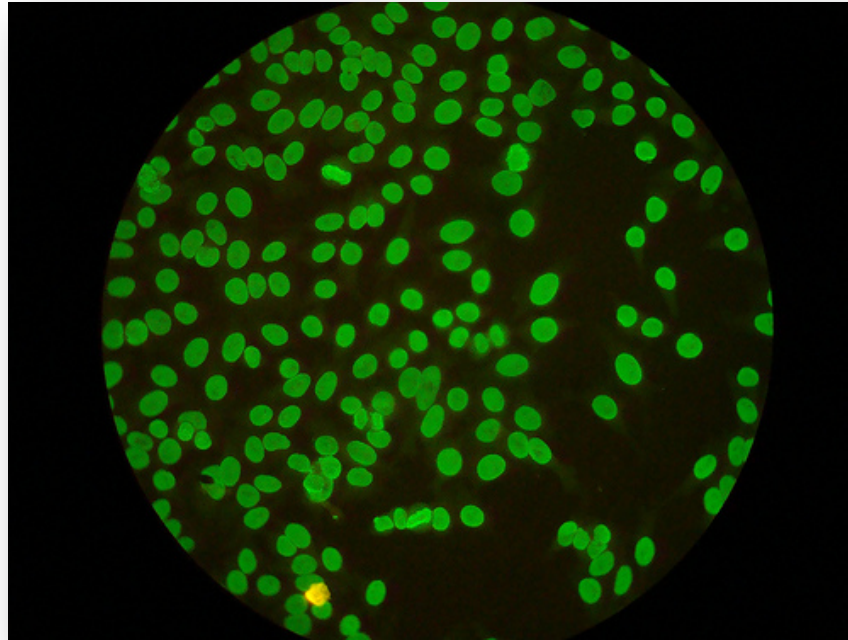
El anticuerpo generado se unirá al microorganismo en cuestión y un segundo anticuerpo proveniente de otro animal, ligado a un compuesto fluorescente reaccionará con el primero de tal manera que permitirá la detección visual del microorganismo en un papel de filtro mediante el uso de un microscopio de fluorescencia (Figura 16).

²⁵ LITTLE, Brenda y WAGNER, Patricia: Microbiologically Influenced Corrosion. Houston: NACE International, 1997.

²⁶ SOOKNAH, Reeta. PAPA VINASAM, Sankara. REVIE, Winston "Monitoring Microbiologically Influenced Corrosion: A Review of Techniques", NACE International, Ottawa – Canadá, 2007

²⁷ ROBERGE, Pierre. "Handbook of Corrosion Engineering", McGraw-Hill. Martinsburg, 2000

Figura 16. Detección de bacterias sulfato-reductoras (BSR) por medio del método del Anticuerpo Fluorescente (FA).



Tomado de: POPE, Daniel "Development of Methods to Detect Sulfate-Reducing Bacteria-Agents of Microbiologically Influenced Corrosion" NACE International, New York, 1990.

En algunos casos los anticuerpos utilizados en esta técnica pueden generar una reacción cruzada, es decir, reaccionan con otros organismos "indeseados", entorpeciendo la medición de la cantidad real de bacterias que se busca detectar y dificultando la diferenciación entre organismos vivos y muertos. Por estos motivos, se sugiere que este método sea complementado con técnicas de cultivo siempre que sea posible²⁸. Actualmente se han desarrollado aplicaciones para la detección de bacterias sulfato-reductoras mediante el uso de anticuerpos incubados en conejos y cabras, reportando resultados satisfactorios²⁹.

²⁸ TUOVINEN, Olli. CRAGNOLINO, Gustavo. "A Review of Microbiological and Electrochemical Techniques in the Study of Corrosion Induced by Sulfate-Reducing Bacteria". ASTM International, Philadelphia, 1986.

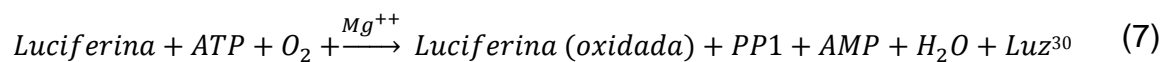
²⁹ POPE, Daniel "Development of Methods to Detect Sulfate-Reducing Bacteria-Agents of Microbiologically Influenced Corrosion" NACE Internacional, New York, 1990.

2.1.2. Métodos Bioquímicos

Los ensayos bioquímicos son técnicas desarrolladas con el fin de detectar organismos específicos asociados a la MIC sin la necesidad de realizar cultivos, ya que se basan en la medición de propiedades constitutivas de éstos, como el ATP, los fosfolípidos y las enzimas adenosin-5'-fosfosulfato (APS) reductasa e hidrogenasa.

Mediciones de ATP

Los ensayos de ATP determinan el número total de organismos viables en una muestra al medir la cantidad de adenosín trifosfato (ATP) presente en ésta. Este nucleótido esencial es clave en el metabolismo bacteriano y en la obtención de energía celular, por lo que se encuentra presente en toda la materia viva, y su evaluación permitirá la identificación de solamente organismos vivos, aumentando la precisión del método al descartar posibles microorganismos no viables (sin vida) que puedan ser contabilizados por otros métodos. El procedimiento consiste en la inyección de una muestra de agua a un reactivo capaz de “liberar” el ATP celular, el cual interactuará con una enzima (luciferasa) para producir una reacción fotoquímica (oxidación de la luciferina); posteriormente la luz emitida será medida con la ayuda de un fotómetro y, de acuerdo a la cantidad de luz emitida, se calculará el número de células microbianas. El proceso general puede resumirse como se indica en la Ecuación (7).



En donde la luciferina es la molécula principal que interviene en el proceso (presente en la luciferasa), y el AMP (adenosín monofosfato) es producto de la

³⁰ SMITH, J.P. “Bacteria Mitigation and Monitoring in IAPCO’S Waterfloods and Production Facilities”, Proceedings Indonesian Petroleum Association, 1984.

reacción junto con la PP1 (proteína fosfatasa 1), el agua y la emisión de luz que será medida posteriormente.

Mediciones de Fosfolípidos

Los ensayos de fosfolípidos se apoyan en el uso de la cromatografía de gases para analizar la composición de las membranas celulares y medir la cantidad de biomasa celular disponible en una muestra²⁸. Análisis de otros componentes de la fracción de fosfolípidos (e. g fosfatos, glicerol-fosfatos) permiten incrementar no solo la sensibilidad sino también la especificidad de los ensayos, pues se han identificado ciertos tipos de lípidos presentes únicamente en algunas BSR los cuales funcionan como biomarcadores de éstas.

Mediciones de Hidrogenasa

En la actualidad se han creado kits comerciales los cuales permiten cuantificar la presencia de bacterias a partir de la detección de enzimas características de cada tipo de microorganismo, como es el caso de la APS reductasa y la hidrogenasa para las BSR. El procedimiento general se basa en la identificación de estas enzimas por medio de soluciones indicadoras que permitan determinar la concentración de éstas en el medio examinado teniendo en cuenta que su presencia es directamente proporcional a la cantidad de microorganismos asociados a ella. En general, estos kits tienen un rango de aplicación menor al de las técnicas de cultivo, lo que hace importante la selección de uno que produzca una respuesta apropiada al problema en consideración.³¹

Ensayos de Actividad Celular

Estos ensayos están basados en el consumo por parte de los microorganismos de un sustrato (molécula sobre la que actúa una enzima) radioisotópicamente marcado con el fin de evaluar la actividad de las poblaciones microbianas en una

³¹ ROBERGE, Pierre. "Handbook of Corrosion Engineering", McGraw-Hill. Martinsburg, 2000.

muestra. En estos métodos la selección del compuesto radiactivo es clave para la interpretación de los resultados, ya que proporciona información sobre los factores que limitan el crecimiento al comparar la actividad en muestras nativas con muestras sintéticas bajo diversas condiciones. El uso de genes “indicadores” capaces de señalar determinadas rutas metabólicas (sucesión de reacciones químicas que llevan desde un sustrato inicial hasta uno o varios productos finales), representa un gran avance en la determinación de las actividades bacterianas dentro de las biopelículas y en las tecnologías de detección bacteriana. Es conveniente aclarar que las técnicas radiactivas no son usualmente empleadas, sin embargo, han encontrado uso en ciertas aplicaciones, que incluyen programas de selección de biocidas, identificación de fuentes de nutrientes y la valoración de procesos metabólicos claves en escenarios de corrosión.

Técnicas Genéticas

Son una serie de métodos que mediante diversos procesos buscan identificar el ARN ribosomal o el ADN presente en las células bacterianas. Teniendo en cuenta que estos ácidos nucleicos son intrínsecos a cada especie bacteriana, estos procesos permiten realizar una caracterización individual de los distintos tipos que se encuentran presentes en la muestra evaluada. Sin embargo, su ejecución requiere la presencia de personal especializado, además de equipos especializados de laboratorio, por lo que se dificulta su aplicación en campo.

Ensayo Inmunoabsorbente ligado a enzimas (ELISA)

En esta técnica se utilizan enzimas ligadas a anticuerpos que buscan detectar un antígeno en una muestra determinada, bacterias en este caso. Los anticuerpos son elementos que reaccionan con un antígeno específico, por lo que este método garantiza una detección individual estimada de cada especie bacteriana presente en la muestra. La reacción antígeno-anticuerpo en la presencia de un marcador enzimático resulta en la generación de un producto detectable que puede ser medido a través de mediciones estándar como la colorimetría. Este método

relativamente sencillo puede ser estandarizado para determinar un tipo específico de antígeno (bacterias u otros microorganismos) presente en una muestra. Sin embargo, resulta ser sensible a interferencias debido a componentes presentes en el medio, como azufre o iones metálicos, que pueden alterar la reacción enzimática³². Actualmente existen presentaciones comerciales de este método para detección de bacterias sulfato-reductoras³³.

2.1.3. Métodos Moleculares

Debido a que las técnicas de detección microbiológicas convencionales presentan problemas al momento de simular las condiciones del sistema y ciertos microorganismos han demostrado ser difíciles de cultivar, nuevas técnicas que involucran el uso de ácidos nucleicos como el ADN y el ARN microbiano para evaluar la presencia de MIC, las cuales serán tratadas a continuación.

Hibridación Fluorescente in situ (FISH)

Esta técnica es considerada como una de las mejores herramientas para la identificación y cuantificación de grupos microbianos específicos presentes en muestras complejas, puesto que se basa en la detección, mediante sondas fluorescentes, de secuencias de ácidos nucleicos pertenecientes a determinados tipos de microorganismos.

Ya que este método sólo marca e ilumina células con cierta cantidad de ARN ribosomal, los organismos vivos pueden ser diferenciados fácilmente de los muertos, sin embargo, bacterias con bajo contenido de ARN pueden no ser detectadas, lo que podría generar resultados erróneos.

³² TUOVINEN, Olli y CRAGNOLINO, Gustavo: "A Review of Microbiological and Electrochemical Techniques in the Study of Corrosion Induced by Sulfate-Reducing Bacteria". Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986.

³³ SOOKNAH, Reeta. PAPA VINASAM, Sankara. REVIE, Winston "Monitoring Microbiologically Influenced Corrosion: A Review of Techniques", NACE International, Ottawa – Canadá, 2007.

Además, la FISH requiere de equipos y personal bastante especializado, lo que limita bastante su uso en campo³⁴.

2.2. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LA MIC

Una vez se ha diagnosticado un problema de corrosión asociado a la MIC, es necesario implementar un sistema de mitigación y tratamiento para reducir los efectos que ésta produce. Son diversos los métodos que pueden aplicarse y que están siendo desarrollados para el tratamiento y el control de las bacterias responsables de la biocorrosión, y aunque existen otras estrategias que puedan contribuir indirectamente en un correcto tratamiento de la MIC, esta sección está dedicada a aquellos métodos que atacan el problema de manera directa, ya sea reduciendo el número de microorganismos responsables o influyendo directamente en las reacciones electroquímicas que se producen en el proceso de corrosión. Sin embargo, es necesaria la implementación de un sistema completo de tratamiento y mitigación para lograr resultados efectivos (ver capítulo 4), así como de un constante monitoreo del sistema que permita evaluar la efectividad de las estrategias utilizadas, como se indicará más adelante.

2.2.1. Biocidas

Los biocidas son sustancias químicas diseñadas para controlar el crecimiento de la población microbiana mediante la reducción del número de microorganismos destruyendo gran cantidad de los organismos presentes. Estos compuestos desempeñan un papel crucial en la mitigación y el control de la corrosión influenciada microbiológicamente, pues son los encargados directamente de mantener un sistema “limpio” para mantener una concentración mínima de microorganismos causantes de la biocorrosión.

³⁴ LARSEN, Jan. KJELLERUP, Birthe. NIELSEN, Jeppe. “Identification of Bacteria Causing Souring and Biocorrosion in the Halfdan Field by Application of New Molecular Techniques”. NACE International, Houston, 2005

La acción de los biocidas puede ser tanto bactericida, fungicida como algicida, pudiendo poseer una o varias de estas propiedades. Es importante decir que la efectividad de estos compuestos depende de la naturaleza de los microorganismos que se está combatiendo y de las condiciones de operación del sistema, por lo que un biocida puede ser efectivo en un determinado tipo de microorganismo y no en otro³⁵.

Aunque generalmente el uso de biocidas suele entregar resultados positivos, muchas veces su efectividad se ve limitada debido a un mal manejo de los programas de tratamiento y a una incorrecta aplicación de los compuestos seleccionados³⁶. Se sabe que en la mayoría de los casos, el uso de un solo biocida no es suficiente para combatir el crecimiento bacteriano y se han documentado casos en los cuales, luego de cierto tiempo, los microorganismos pueden presentar resistencia un biocida en particular. Además, se ha determinado que bacterias de una misma especie, previamente expuestas a biocidas son más resistentes al efecto antimicrobiano que aquellas nunca antes expuestas³⁷, por lo que es necesario implementar un sistema dinámico de aplicación y en la mayoría de los casos emplear más de un tipo de biocida para disminuir estos efectos adversos. En el pasado, los biocidas eran desarrollados con un gran efecto antimicrobiano, un amplio rango de aplicación para diversos tipos de organismos y una gran durabilidad en el medio, por lo que compuestos a base de mercurio y pentaclorofenol eran comúnmente utilizados, los cuales dotaban a los biocidas de una gran toxicidad no solo a nivel microbiológico, esto sumado al pobre tratamiento que se solía dar a las aguas de vertimiento, suponían un gran riesgo para la vida macroscópica.

³⁵ VIDELA, Héctor A. "Prevention and Control of Biocorrosion" International Biodeterioration & Biodegradation, Universidad de la Plata. La Plata, Argentina, 2002

³⁶ MAXWELL, S. MACKENZIE, G. KUIJVENHOVEN, C. LOMANS, B. GRANLI, T "Laboratory Studies of Microbicide and Nitrate Strategies for MIC and Reservoir Souring Mitigation", NACE International, Escocia, 2008.

³⁷ LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

No obstante, debido a la tendencia actual y a las crecientes normas de protección ambiental, se busca utilizar compuestos de mínima ecotoxicidad que cumplan con fines específicos para diversos sistemas en cuestión³⁸.

Aunque la selección adecuada de un biocida depende de su efectividad específica contra los microorganismos presentes, existen propiedades generales que éstos requieren para poder ser utilizados en sistemas industriales. A continuación se resumen estas propiedades:

- ✓ Solubilidad en el medio.
- ✓ Capacidad de mantener su efecto antimicrobiano en presencia de otros compuestos y a las condiciones de operación del sistema.
- ✓ Biodegradabilidad.
- ✓ Bajo costo.

Biocidas y su mecanismo de acción

Como es sabido, existen diversos tipos de microorganismos asociados a la MIC con estructuras celulares diversas, lo que hace que posean propiedades distintas tanto en forma como en su metabolismo. Las principales diferencias se dan a nivel de paredes y membranas celulares, que son aquellas barreras que se encuentran alrededor de la bacteria que las protege de agentes externos y permite intercambios iónicos entre ésta y el medio. Estas barreras no pueden ser atacadas por todos los tipos de biocidas, lo que explica las variaciones en sensibilidad de distintos tipos de organismos bacterianos hacia el mismo agente biocida. El efecto antimicrobiano de estos compuestos se relaciona con la interacción de sus ingredientes activos con el cuerpo de la bacteria³⁸.

Biocidas de membrana activa

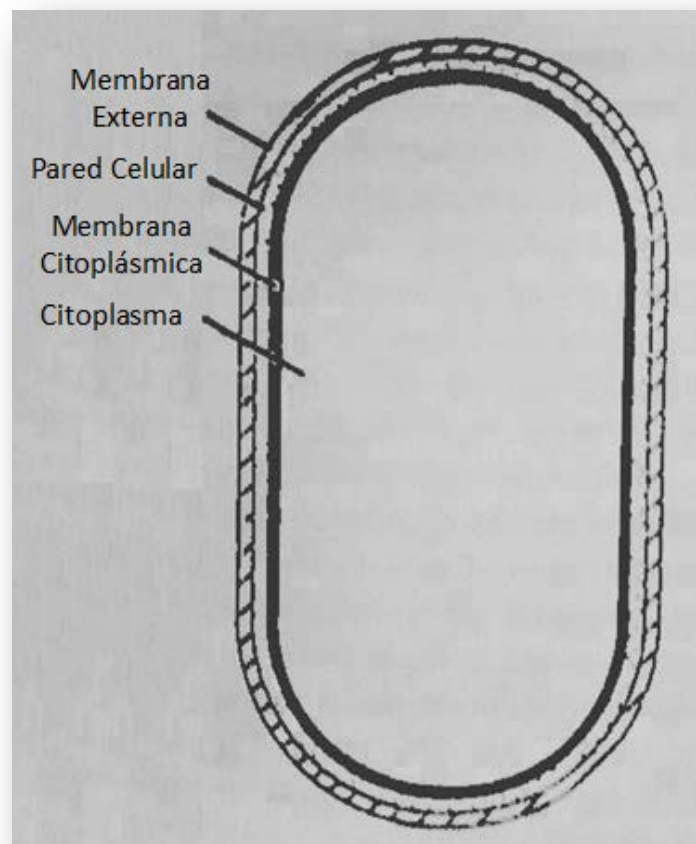
En la anatomía bacteriana existen diversas partes esenciales para la vida y el desarrollo. La pared celular, por ejemplo, es aquella que se encarga de darles

³⁸ HEITZ, E. FLEMMING, H. C. SAND, W "Microbially Influenced Corrosion of Materials" Springer, Berlín, 1996.

forma y estabilidad, lo que les permite soportar su presión osmótica interna. Estas paredes celulares varían considerablemente en su composición y en su complejión, encontrándose más firmemente unidas a la membrana celular en unas bacterias que en otras aumentando así su resistencia al efecto biocida.

La membrana externa da protección, junto con la pared celular, a la membrana más sensible y delgada que rodea el citoplasma conocida como membrana citoplásmica, la cual funciona como una especie de “tamiz molecular” que controla la entrada y salida de sustancias y/o iones esenciales para el correcto desarrollo bacteriano (Figura 17)³⁸.

Figura 17. Estructura básica de membranas celulares.



Fuente: Tomado y modificado de HEITZ, E. FLEMMING, H. C. SAND, W
“Microbially Influenced Corrosion of Materials” Springer, Berlín, 1996

Los biocidas de membrana activa son sustancias que atacan precisamente este tipo de estructuras bacterianas. Sus ingredientes activos (que involucran alcoholes, fenoles, ácidos, salicilanilidas, carbanilidas, sales cuaternarias de amonio, etc.) interactúan con la membrana externa y las demás barreras bacterianas, provocando una pérdida en su integridad, permitiendo que las moléculas microbicidas ingresen en la bacteria, lo que entre otras cosas, produce un escape de componentes esenciales, una segregación del citoplasma y finalmente la desintegración de la célula³⁸. Dentro de la familia de ingredientes activos presentes en biocidas de membrana activa se encuentran³⁹:

- ✓ Compuestos cuaternarios de amonio
- ✓ Tributyl tetradecyl chloro phosphonium (TTPC)
- ✓ polioxietilen (dimetiliminio) etileno (dimetiliminio) etileno dicloro

Algunos de éstos son ampliamente utilizados en la industria del petróleo y gas, tal como se indicará más adelante.

Biocidas Electrofílicos

Esta clase de biocidas reaccionan con grupos químicos ricos en electrones, como ciertos nucleófilos celulares (compuestos con tendencia a ceder electrones) como tioles, alcoholes y aminas de algunas enzimas y proteínas por lo que pueden inhibir funciones metabólicas importantes como la respiración celular o la retención de iones lo que provocaría una eventual muerte celular. Dentro de los tipos de ingredientes activos de los biocidas electrofílicos se encuentran:

- ✓ Biocidas a base de aldehídos
- ✓ Isotiazolinonas
- ✓ Dibromonitrilopropionamida (DBNPA)
- ✓ Glutaraldehído (GA)
- ✓ Bronopol o 2-bromo-2-nitro-1,3-propanediol (BNPD)

³⁹ BARTLETT, Kimberly. KRAMER, Jeffrey “Comparative Performance of Industrial Water Treatment Biocides”. NACE International, USA, 2011.

Clasificación de biocidas según su naturaleza química

Los biocidas según su naturaleza química pueden clasificarse en dos grupos: oxidantes y no oxidantes.

Biocidas oxidantes

Los biocidas oxidantes no son muy utilizados en la industria del petróleo debido a ciertos efectos negativos que suelen presentar al momento de su aplicación. Entre estos están su alta reactividad con otros químicos presentes en el sistema (como inhibidores de corrosión), la formación de ciertos productos halogenados e irónicamente su relativamente alto potencial corrosivo. Pese a esto existen ciertos biocidas oxidantes conocidos, como el cloro (Cl_2) que al reaccionar con el agua produce ácido clorhídrico y presenta una buena efectividad para la desinfección y el control de microorganismos⁴⁰ (Ecuación 8).



Una desventaja de la desinfección con cloro es su baja efectividad en ambientes alcalinos, se estima un rango óptimo de efectividad de entre 6.5 - 7.5 de pH. Se han observado buenas propiedades algicidas y bactericidas debido al uso de cloro como desinfectante.⁴¹

Los compuestos a base de bromo pueden formar ácidos hipobromosos (HOBr). Un método usual de aplicación de bromo como biocida es el uso de hidantoínas bromadas, como el bromo-cloro-dimetil-hidantoína (BCDMH) y el bromo-cloro-etilmetil-hidantoína (BVEMH) que han demostrado ser bastante efectivos a bajas concentraciones en el control de bacterias planctónicas⁴⁰.

⁴⁰ BORENSTEIN Susan W, "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Publishing Ltd. Cambridge CB1 6AH, England, 1994.

⁴¹ VIDELA, Héctor A. "Prevention and Control of Biocorrosion" International Biodeterioration & Biodegradation, Universidad de la Plata. La Plata, Argentina, 2002.

El uso del ozono (O_3) ha aumentado con el tiempo, principalmente debido a las restricciones que se han impuesto al uso de otros biocidas y a algunas propiedades que posee que lo hacen un agente biocida bastante efectivo entre los que se encuentra⁴⁰:

- ✓ Enorme poder oxidativo que lo hace altamente efectivo contra la mayoría de colonias bacterianas presentes en los sistemas industriales.
- ✓ Mínima concentración residual.
- ✓ Bajo índice de agresión a estructuras metálicas.
- ✓ Propiedades anti-incrustantes.

Como puede observarse, estas propiedades hacen bastante atractivo el uso de ozono en sistemas industriales. Concentraciones de alrededor de 0,2 mg/L son suficientes para controlar sistemas con baja contaminación orgánica, mientras que un rango de concentración de tan solo 0,2 a 1 mg/L es efectivo para sistemas altamente contaminados (Videla, 2002). Sin embargo al ser una sustancia gaseosa, su manipulación involucra riesgos de seguridad, además de dificultar su aplicación en sistemas industriales³⁹. Otra gran desventaja a la hora de seleccionar al ozono como agente biocida, es la relación costo/beneficio con respecto a los biocidas convencionales.

Finalmente, como último de los biocidas oxidantes más conocidos se encuentra el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que es tal vez el compuesto más económico y seguro de todos los anteriormente mencionados. Para su aplicación en sistemas industriales se requiere de un tiempo de contacto bastante largo para lograr un efecto antimicrobiano adecuado⁴⁰. En la Tabla 1 se encuentran resumidos los biocidas oxidantes más conocidos en la actualidad:

Tabla 1. Biocidas oxidantes

Biocidas Oxidantes	Limitaciones Operacionales	Limitaciones/Precauciones	Información técnica requerida	Comentarios
Cloro	Rango óptimo de 6.5 -7.5 de pH	Inyección continua y por baches para inhibición bacteriana	Variaciones en conteos bacterianos, pH, temperatura, sólidos suspendidos, materia orgánica, niveles de hierro en el sistema	Puede ser utilizado en puntos de múltiple inyección
Ácido hipobromoso	Mejor efectividad a pH superior a 7.5	Inyección continua y por baches para inhibición bacteriana	Igual que el cloro	-
Ozono	Oxida el hierro y el manganeso, causando depositación materiales inorgánicos	Debilitamiento de empaques de caucho luego de exposición al ozono	Igual que el cloro	Aplicable a sistemas estáticos
Peróxido de Hidrógeno	-	Requiere largos periodos de contacto	Igual que el cloro	No contaminante, aplicable a sistemas estáticos

Fuente: Tomada y modificada de LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

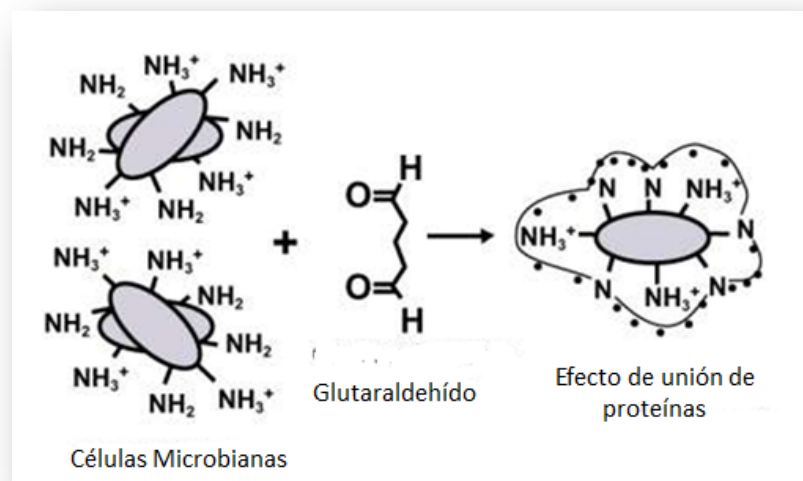
Biocidas no oxidantes

Este tipo de biocidas son los más utilizados en sistemas industriales además de ser más efectivos que los oxidantes, debido a su gran control de bacterias, algas y hongos, y porque son más resistentes a condiciones del sistema como el pH. Estos compuestos reaccionan directamente con los componentes celulares de las bacterias a diferencia de los biocidas oxidantes que tan solo oxidan la superficie o la estructura interior de los microorganismos (Borenstein, 1994). Dentro de los tipos de biocidas no oxidantes se encuentran:

Glutaraldehído (GA)

Es el principal tipo de biocida a base de aldehídos, utilizado como ingrediente activo en gran variedad de biocidas comerciales para la industria. Como se indicó anteriormente, es un biocida electrofílico que reacciona con proteínas esenciales para el desarrollo bacteriano (Figura 18).

Figura 18. Efecto del Glutaraldehído como biocida electrofílico.



Fuente: Tomada y modificada de CANALIZO-HERNANDEZ, Mónica “Biocidas usados comúnmente en la industria del Petróleo y Gas, DOW, Microbial Control

Es muy efectivo en el control de algas, hongos y bacterias, y ha sido ampliamente usado para el control de bacterias sulfato-reductoras tanto planctónicas como sésiles (presentes en la biopelícula)⁴². Es utilizado en un amplio espectro de temperaturas, y en un rango de entre 6 – 8 de pH. Poco efectivo en pH's ácidos, pues su efectividad disminuye conforme éste lo hace⁴³. Es un compuesto soluble en agua e insoluble en aceite, incompatible en presencia de sustancias alcalinas o

⁴² GANZER, G.A. MCILWAINE, J.A. DIEMER, M. Freid. RUSSO, M. “Applications of Glutaraldehyde in the Control of MIC” NACE International, Houston, Texas – USA, 2001.

⁴³ BARTLETT, Kimberly. KRAMER, Jeffrey “Comparative Performance of Industrial Water Treatment Biocides”. NACE International, USA, 2011.

ácidos fuertes, pero altamente compatible con compuestos cuaternarios de amonio⁴⁴. Es una sustancia química bastante tóxica, que puede causar daños irreversibles en los ojos y en la piel si no es manejada con precaución⁵². Grandes cantidades pueden generar efectos ambientales adversos, por lo que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) prohíbe su uso a concentraciones mayores a 50 ppm⁴³.

Acroleína

Es un compuesto acíclico de tres carbonos altamente reactivo y efectivo contra un gran espectro de bacterias, biopelículas e incluso macroorganismos, lo que se traduce en una toxicidad bastante elevada con grandes repercusiones ambientales⁴⁵. Altamente riesgoso para la salud. No se recomienda su uso en campo.

Compuestos cuaternarios de amonio (QUATS)

Pertencen a la familia de los biocidas de membrana activa debido a su capacidad de atacar directamente la estructura celular, principalmente al disolver los lípidos presentes en el cuerpo bacteriano. Son compuestos de doble acción, puesto que funcionan igualmente como inhibidores de corrosión mediante la formación de películas protectoras en zonas internas del material afectado. Este fenómeno de formación de películas protectoras se ha venido estudiando como un posible método de prevención de la MIC debido a que estas capas inhibirían la formación de biopelículas en las superficies metálicas⁴³, lo que supondría un gran avance en el tema de la biocorrosión. Son altamente solubles en agua, y compatibles con distintos biocidas oxidantes como el cloro y el peróxido de hidrógeno. Son sustancias biodegradables.

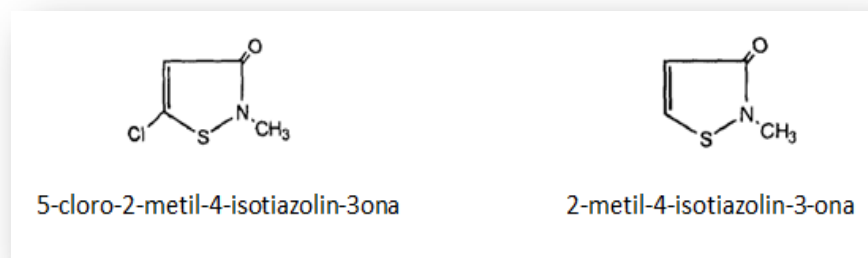
⁴⁴ VIDELA, Héctor A. "Prevention and Control of Biocorrosion" International Biodeterioration & Biodegradation, Universidad de la Plata. La Plata, Argentina, 2002

⁴⁵ LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

Isotiazolinonas (ISO)

Son biocidas compuestos de anillos de sulfuro unidos a moléculas de nitrógeno y oxígeno (ver figura 19). Son considerados compuestos de rápida actuación altamente efectivos contra algas y bacterias, principalmente contra poblaciones pequeñas de bacterias sulfato-reductoras.

Figura 19. Fórmula química de las isotiazolinonas



Fuente: Tomada y modificada de WILLIAMS, Terry M. LEVY, Richard. HEGARTY, Bryan "Control of SRB Biofouling and MIC by Chloromethyl-Methylisothiazolone". NACE International, 2001.

Son compuestos solubles en agua y tienen gran capacidad de mezclarse con otros biocidas. Poseen un espectro de aplicación bastante amplio, con rangos óptimos de pH de entre 5.5 a 9.5, pero con gran habilidad de trabajar en ambientes ácidos y alcalinos sin perder efectividad de manera significativa⁴², lo que los convierte en biocidas ampliamente utilizados en la industria del petróleo. Sin embargo, su acción es inhibida en presencia de H₂S, lo que los hace poco eficaces en presencia de grandes cantidades de BSR.

Metileno bistiocianato (MBT)^{42 43}

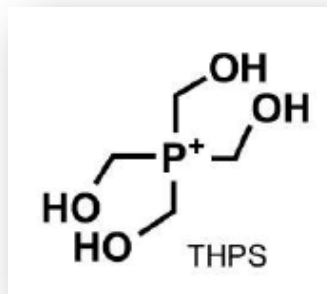
Es un compuesto sulfurado con un mecanismo de acción similar a las isotiazolinonas, que interfieren en la transferencia de electrones de los citocromos

(proteínas esenciales para la vida celular) convirtiéndolo también en un biocida de rápida acción. Su principal desventaja es su gran sensibilidad a los cambios de pH, por lo que no se recomienda utilizar este compuesto en sistemas con pH mayor a 8. Es efectivo en control de hongos y bacterias, principalmente sulfato-reductoras.

Sulfato de tetrakis (hidroximetil) fosfonio (THPS)⁴³

Compuesto altamente soluble en agua con un gran espectro antimicrobiano contra bacterias, especialmente anaeróbicas (sulfato-reductoras y productoras de ácido), hongos y algas. Es un biocida de fácil manejo, de baja ecotoxicidad y de gran compatibilidad con otros tratamientos químicos. Posee la capacidad de disolver el sulfuro de hierro que es uno de los principales desechos del proceso corrosivo. Su fórmula química se encuentra representada en la Figura 20.

Figura 20. Fórmula Química del THPS



Fuente: Tomada y modificada de CANALIZO-HERNANDEZ, Mónica “Biocidas usados comúnmente en la industria del Petróleo y Gas, DOW, Microbial Control

Principales biocidas utilizados en la industria

Actualmente en la industria, existen más de 250 tipos de biocidas comerciales disponibles, cada uno con propiedades físicas y químicas que lo distinguen. Esta amplia diversidad responde al hecho de que cada compuesto está diseñado para trabajar con determinados tipos de microorganismos bajo distintas condiciones

ambientales. La Tabla 2 compila y resume los biocidas anteriormente descritos, los usos con más frecuencia en la industria y las mezclas más populares usadas en sistemas industriales.

Tabla 2. Principales biocidas y mezclas utilizadas en la industria

Biocida	Organismos que ataca	Mecanismo de Acción	Limitaciones y/o comentarios
Glutaraldehído**(GA) ^{42 43 44 46}	Efectivo contra bacterias, algas y hongos	Unión de proteínas (Biocida electrofílico)	Soluble en agua, insoluble en aceite. Altamente tóxico (concentración máx. 50 ppm). pH óptimo (6 - 8)
Compuestos cuaternarios de amonio** (QUATS) ^{43 44 46}	Bacterias y algas	Ataca la pared celular (Biocida de Membrana Activa)	Biodegradable, doble acción; Inhibidora y Bactericida. Compatible con Biocidas oxidantes.
Isotiazolinonas** (ISO) ^{43 44 46}	Bacterias y algas	Biocida electrofílico	Rápida acción, gran espectro de pH (5,5 – 9,5) Gran capacidad de formar mezclas con otros biocidas
Metileno Bistiocianato (MBT) ⁴³	Hongos y Bacterias	Mecanismo similar a las isotiazolinonas (Biocida electrofílico)	Demasiado sensibles a cambios de pH
2-Bromo-2-nitro-1,3-propanediol o Bronopol (BNPD) ^{43 46}	Bacterias	Reacciona con las enzimas bacterianas (Biocida electrofílico)	Es un biocida de rápida acción, con velocidades mayores a las ISO y MBT
Mezcla de GA/QUAT ⁴³	Bacterias, algas y hongos	Mezcla de un biocida electrofílico con uno de membrana activa	La mezcla de los dos mecanismos de acción lo convierte en una mezcla de muy rápida acción biocida.
Mezcla de ISO/BNPD ⁴³	Bacterias y algas	Biocida electrofílico	El BNPD posee un espectro bastante pobre aplicación de pH, sin embargo la mezcla con ISO aumenta el espectro

** Biocidas utilizados ampliamente en sistemas de petróleo y gas, principalmente contra BSR

⁴⁶ WOODWARD, Janet H. "Bactericides, Fungicides, and Algicides" ASTM International, Biocide Group – Paper Technologies Division, Buckman Laboratories, Memphis, 2012.

Factores que afectan la efectividad de los biocidas

Independientemente de su efectividad microbiológica, la efectividad general de los biocidas depende de en gran medida de ciertas condiciones ambientales o del sistema que pueden afectar, positiva o negativamente, su desempeño como agente antimicrobiano. Es necesario realizar un constante monitoreo de estas variables para escoger el biocida más adecuado y para conocer su desempeño “real” al momento de ser aplicado. Los factores más influyentes son resumidos en la Tabla 3:

Tabla 3. Factores operacionales que disminuyen la efectividad de los biocidas

Factores operacionales que disminuyen la efectividad de un biocida	
pH	Es uno de los factores más influyentes a la hora de seleccionar una serie de biocidas para tratamiento de la MIC. La mayoría de biocidas son demasiado sensibles a cambios en el pH, pudiéndose disminuir drásticamente su efectividad.
Aumento en temperatura	En casi la totalidad de biocidas, el efecto antimicrobiano se ve comprometido con el aumento de la temperatura.
Compuestos no compatibles	El efecto de algunos biocidas puede verse reducido, inhibido o incluso desactivado por la presencia de ciertos compuestos químicos incompatibles
Baja solubilidad	Los biocidas utilizados en el control de la MIC deben ser solubles en agua. Una baja solubilidad disminuirá drásticamente la efectividad del agente antimicrobiano
Luz ultravioleta	Se ha encontrado que exposición a luz ultravioleta puede descomponer ciertos fungicidas y algicidas. Sin embargo, esto no suele suponer riesgos en sistemas de control de la MIC para sistemas de petróleo y gas, en gran parte debido a que las zonas afectadas suelen ser partes internas de tuberías y otros equipos, lo que los mantiene en ausencia de luz.

Fuente: Tomada y modificada de WOODWARD, Janet H. “Bactericidas, Fungicidas, and Algicidas” ASTM International, Memphis, 2012.

Medidas Regulatorias ⁴⁶

Debido a la creciente tendencia de cuidado ambiental, varios tipos de biocida han sido paulatinamente discontinuados. En los Estados Unidos, biocidas a base de mercurio fueron prohibidos durante los años 90. Posteriormente diversos biocidas a base de TBT (Tributilo de estaño) también fueron prohibidos en varios países como Francia, Japón, Estados Unidos, El Reino Unido y Alemania.

Tal vez el logro más grande en cuanto medidas de protección ambiental, fue la creación de la Directiva de Productos Biocidas de la Unión Europea en mayo de 2002, la cual estableció una lista de ingredientes activos permitidos en la producción de biocidas con el fin de disminuir los impactos provocados al medio ambiente y a la salud humana. Actualmente se siguen desarrollando nuevas regulaciones alrededor del mundo con el fin de reducir el impacto ambiental del uso de biocidas. Es necesaria la implementación y cumplimiento de este tipo de normatividades, principalmente en grandes industrias como la petrolera que tienen la obligación de mitigar los grandes daños que ésta genera a la naturaleza.

2.2.2. Inhibidores de Corrosión

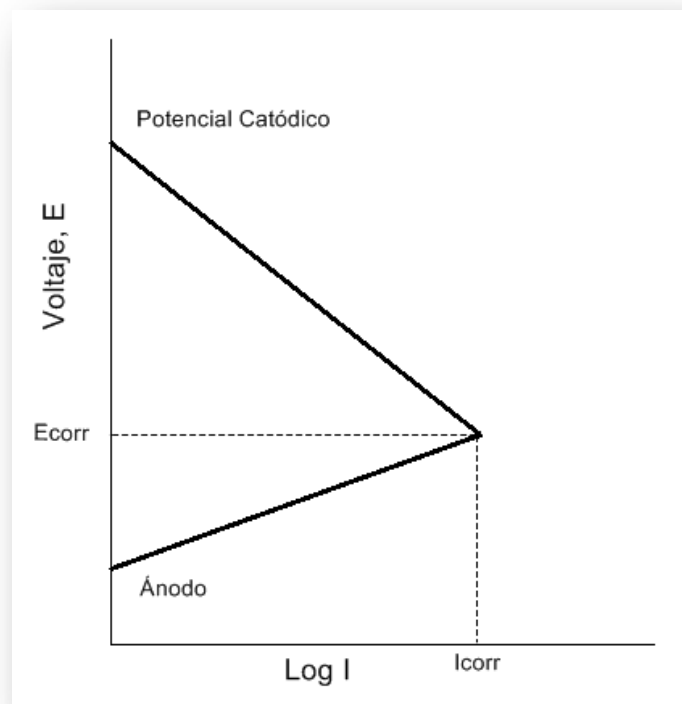
Los inhibidores son sustancias químicas que, al aplicarse en pequeñas cantidades, reducen o previenen las reacciones químicas que ocurren entre las biopelículas y la superficie de los materiales con el fin de disminuir su corrosión. Existen diversas clasificaciones de acuerdo a varios autores, sin embargo el esquema de organización más popular hoy en día consiste en la agrupación de los inhibidores de acuerdo a su funcionalidad:

Inhibidores Anódicos

La polarización se define como el cambio en el potencial eléctrico en un electrodo provocado por el paso de una corriente eléctrica, y su ocurrencia está directamente relacionada con la tasa de corrosión. Al graficar de forma semi-

logarítmica la densidad de corriente (corriente por unidad de área) contra el potencial eléctrico, tanto en el ánodo como en el cátodo, se obtienen dos curvas conocidas como curvas de polarización; el punto en el que se cruzan se conoce como el potencial de corrosión o potencial de circuito eléctrico (E_{corr}), y se define como el potencial al cual las reacciones catódica y anódica ocurren a la misma velocidad (Figura 21).

Figura 21. Curvas de polarización catódicas y anódicas en diagrama Potencial vs Corriente.



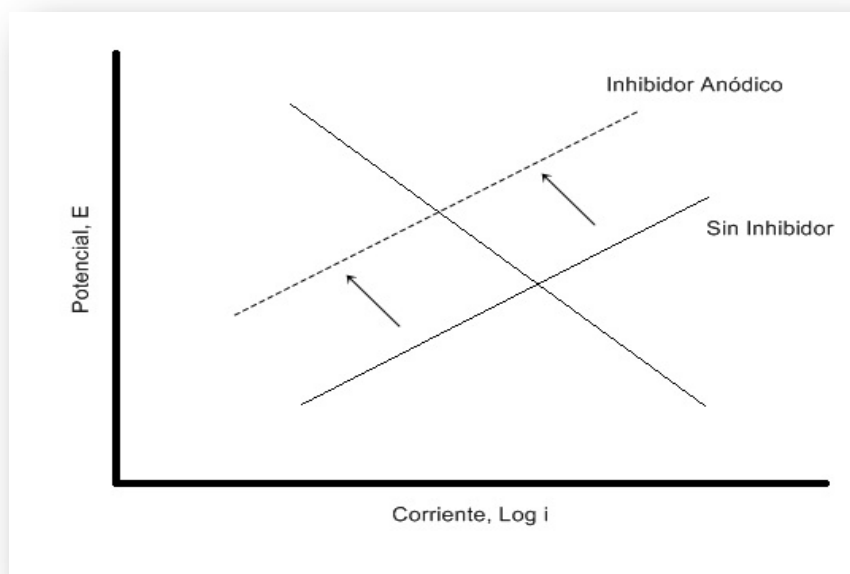
Fuente: Tomada y modificada de BORENSTEIN, Susan. "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 1994.

Los inhibidores anódicos provocan un cambio en la curva de polarización anódica del sistema, al cubrir los sitios anódicos en la superficie del material; lo cual se traduce en un aumento del potencial de corrosión y una disminución en la tasa de

corrosión (ver figura 22)⁴⁷. Por otro lado, en cuanto a su aplicación, generalmente son efectivos en un rango de pH de 6,5 a 10,5. Existen dos tipos de inhibidores anódicos: los oxidantes, entre los que se encuentran los cromatos, nitritos, nitratos; y los no-oxidantes como fosfato, tungstato y molibdato.

Diversos estudios han demostrado que el uso de estos compuestos acarrea un gran riesgo puesto que ciertos microorganismos tienen la facultad de degradarlos y utilizarlos como fuente de alimento, perjudicando su rendimiento al disminuir sus concentraciones hasta tal punto que pueden llegar a acelerar los procesos corrosivos en vez de mitigarlos.^{48 49}

Figura 22. Efecto de los inhibidores Anódicos sobre las curvas de polarización.



Fuente: Tomada y modificada de DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

⁴⁷ DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

⁴⁸ VIDELA, Héctor y HERRERA, Liz. "Understanding Microbial Inhibition of Corrosion. A Comprehensive Overview". Elsevier Ltd. 2009.

⁴⁹ MUTHUKUMAR, M.; MARUTHAMUTHU, S.; MOHANAN, S.; PALANISWAMY, N. "Oil Soluble Corrosion Inhibitor on Microbiologically Influenced Corrosion in Diesel Transporting Pipeline". Portugaliae Electrochimica Acta 25, 2007.

Inhibidores Catódicos

Los inhibidores de corrosión catódicos poseen tres mecanismos mediante los cuales inhiben los procesos de corrosión:

- ✓ Compuestos de arsénico, bismuto o antimonio, conocidos como “venenos catódicos”, trabajan disminuyendo la tasa de reducción de hidrogeno en soluciones ácidas.
- ✓ Iones de calcio, zinc o magnesio, tienen la capacidad de precipitar hidróxidos en medios alcalinos en los sitios catódicos, creando una capa protectora sobre el metal.
- ✓ Los eliminadores de oxígeno, como su nombre lo indica, remueven O_2 a través de una reacción química en medios preferiblemente alcalinos o con un pH neutro, previniendo la despolarización catódica causada por este. Entre los más usados se encuentran los iones sulfito y la hidracina.

Estos inhibidores están siendo reemplazados actualmente, debido a sus altos costos y a los daños que pueden provocar al medio ambiente, por otros más “ecoamigables”, como los inhibidores orgánicos que serán explicados posteriormente.⁵⁰

Inhibidores Óhmicos

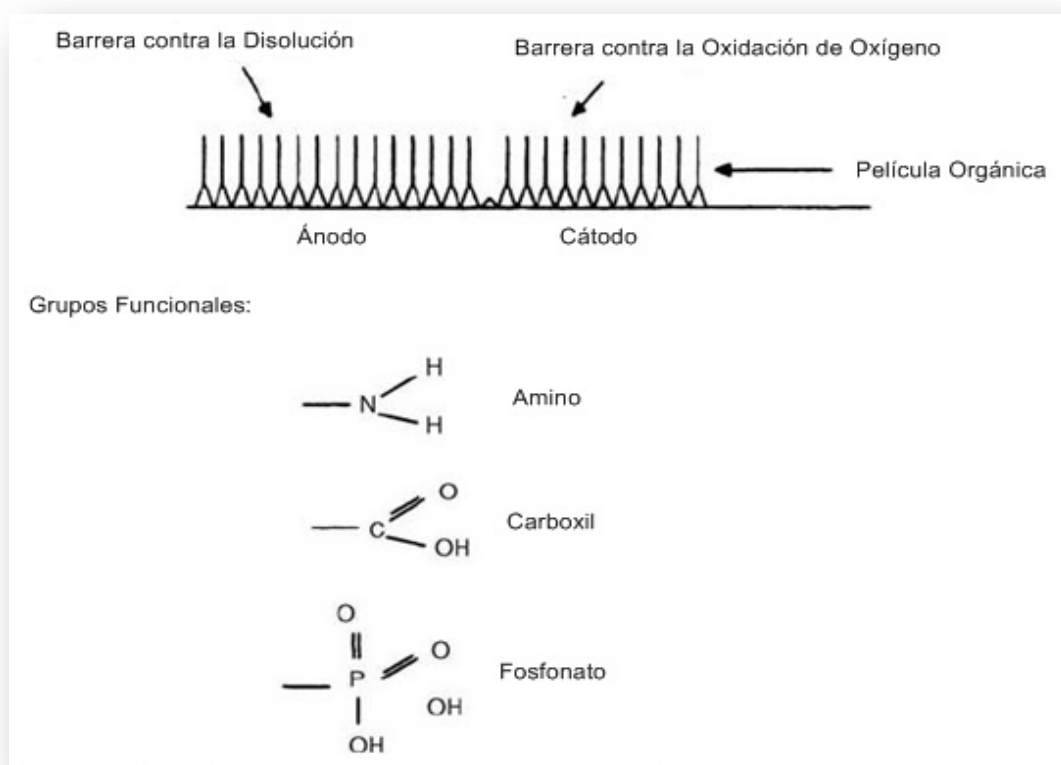
Estas sustancias reducen la tasa de corrosión al dificultar el paso de las especies iónicas entre los ánodos y cátodos formados sobre la superficie metálica (reducción de la conductividad iónica de la solución); y su funcionamiento depende principalmente de que tanto es adsorbido por la superficie a tratar. En la actualidad, los inhibidores óhmicos de mayor aplicación incluyen ciertas aminas, las cuales son catiónicas, y sulfonatos, los cuales son aniónicos.⁴⁷

⁵⁰ DIETSCHKE, Frank; HEIDENFELDER, Thomas; WITTELER, Helmut. “Organic Corrosion Inhibitors for Industrial Water Treatment. NACE International, Houston, 2007.

Inhibidores de Precipitación

Son inhibidores que afectan de forma global la superficie del material en cuestión, ya que generan la formación de precipitaciones que crean una barrera protectora tanto en los sitios anódicos como en los sitios catódicos, previniendo la difusión de oxígeno y la reducción de hidrógeno al mismo tiempo. Muchos compuestos de tipo orgánico funcionan como inhibidores de precipitación⁵¹, así como sustancias que contienen iones silicatos y fosfatos, en la Figura 23 se presenta su mecanismo de acción así como algunos grupos funcionales pertenecientes a este grupo de inhibidores.

Figura 23. Mecanismo de protección de los inhibidores orgánicos.



Fuente: Tomada y modificada de SASTRI, Vedula. "Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2011.

⁵¹ SASTRI, Vedula. "Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2011.

Su aplicación en la industria ha ido incrementando porque resultan bastante útiles y han mostrado buenos resultados en situaciones en las que son necesarios aditivos que no sean tóxicos (Dietsche et al., 2007), no obstante, la protección generada en ciertas situaciones no es la esperada dado que esta depende en gran medida de la composición del medio que está siendo tratado y de las condiciones ambientales a las que se esté trabajando⁵².

Aplicaciones en la industria del Petróleo y el Gas

Desde los inicios de la industria misma, varias sustancias químicas han sido aplicadas en los pozos con el fin de combatir los diversos tipos de procesos corrosivos que con frecuencia se presentaban en las tuberías y otros equipos, no obstante, ningún avance significativo se presentó hasta que se empezaron a usar las aminas y las imidazolininas, desde este punto y a medida que avanzó el tiempo, nuevas investigaciones fueron realizadas, las cuales llevaron al descubrimiento de una amplia variedad de inhibidores disponibles hoy en día para combatir la corrosión. Tal ha sido el desarrollo de las tecnologías de inhibición que se han logrado hallar compuestos de baja toxicidad que pueden mitigar efectivamente la MIC, al prevenir la fijación de células microbianas a las superficies metálicas, reduciendo e incluso haciendo innecesario el uso de biocidas en los sistemas, disminuyendo los costos de tratamiento⁵³.

Los inhibidores usados generalmente en la industria pueden ser clasificados, de manera sencilla, de la siguiente manera:

- ✓ Amidas/Imidazolininas.
- ✓ Sales de moléculas nitrogenadas con ácidos carboxílicos.
- ✓ Nitrógenos cuaternarios.
- ✓ Amidas, aminas e imidazolininas polioxialquiladas.
- ✓ Nitrógenos heterocíclicos y compuestos con P, S y O.

⁵² ROBERGE, Pierre. "Handbook of Corrosion Engineering". McGraw-Hill, Martinsburg, 2000.

⁵³ PRASAD, Rupi. "Selection of Corrosion Inhibitors to Control Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, Houston, 1998.

Su aplicación puede ser de forma continua o a baches, dependiendo de las condiciones y las necesidades del usuario; las inyecciones de forma continua se realizan con concentraciones desde menos de 50 hasta más de 1000 ppm, y aseguran una máxima protección del sistema, sin embargo, muchos pozos no cuentan con las facilidades adecuadas y el tratamiento resulta siendo altamente costoso, por esta razón, en varias ocasiones se opta por una inyección a baches, que puede ser libre o asistida por un fluido de empuje, del 2% al 10% en volumen de inhibidor⁵².

2.2.3. Otros Métodos

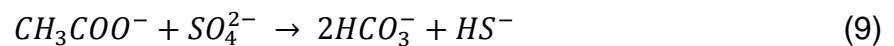
Corresponden a una serie de técnicas cuyo mecanismo de mitigación no es químico, y entre los cuales se encuentran la competencia natural y la protección catódica. Cada uno de estos métodos debe ser evaluado para determinar la opción más adecuada en términos de economía y eficacia.

Competencia Natural

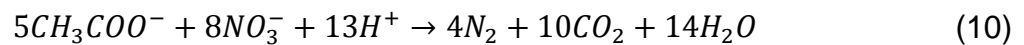
Como se explicó en el capítulo anterior la presencia de bacterias sulfato-reductoras (BSR) en los sistemas de producción es a menudo problemática, puesto que el desarrollo de sus actividades metabólicas eleva el riesgo de ocurrencia de corrosión (MIC). Comúnmente la estrategia más usada para mitigar los efectos negativos asociados a ellas es el uso de biocidas, sin embargo una gran limitación de este proceso es el hecho de que los microorganismos pueden desarrollar inmunidad a estos, por lo tanto, se han investigado nuevos enfoques que permitan lidiar con esta situación de forma efectiva y económica⁵⁴. Fue así como nació la técnica de competencia natural, la cual se basa en la inyección de nitratos para incitar el crecimiento de las bacterias nitrato-reductoras (BNR) las cuales inhiben las actividades de las BSR, a través de una oxidación biológica, la

⁵⁴ VOORDOUW, G.; NEMATI, M.; JENNEMAN, G. E. "Use of Nitrate-Reducing, Sulfide-Oxidizing Bacteria to Reduce Souring in Oil Fields: Interactions with SRB and Effects on Corrosion". NACE International, Houston, 2002.

generación de nitrógenos intermedios (e.g. NO_2^- , NO y N_2O) y la competición por nutrientes esenciales, la cual se presenta debido a la necesidad que tienen ambas especies de utilizar ciertos compuestos orgánicos en sus procesos celulares como, por ejemplo, algunas BSR que oxidan el acetato formando sulfuros:



Sin embargo, existen BNR que reducen nitrato, a expensas de una fuente de energía como el acetato, en nitrógeno.



Para concluir, hay que tomar en cuenta que las BSR no son eliminadas en ningún momento del proceso anteriormente descrito sino que permanecen inactivas, por lo tanto, una vez no haya nitrato presente en el medio las actividades de estos microorganismos serán reanudadas.⁵⁵

Protección Catódica (CP)

Como es sabido, la presencia de biopelículas en las superficies sumada a las actividades microbianas dentro de esta, provocan la aparición de ánodos y cátodos locales que generan pérdida del material de forma localizada en los sitios anódicos debido a la diferencia de potencial que existe entre ellos. La protección catódica es un método que permite disminuir o eliminar esta corrosión al convertir el metal en un cátodo a través de la aplicación de una corriente externa contraria a la corriente de corrosión⁵⁶.

Otra consideración a tomar en cuenta es que la CP incrementa el pH de la interfase metal/solución provocando a su vez una liberación de iones hidroxilos que disminuyen la solubilidad de compuestos de calcio y magnesio, esto lleva a la

⁵⁵ LARSEN, Jan. "Downhole Nitrate Applications to Control Sulfate Reducing Bacteria Activity and Reservoir Souring". NACE International, Houston, 2002.

⁵⁶ DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

generación de depósitos calcáreos que interactúan con las biopelículas, modificando sus estructuras e inhibiendo los procesos de MIC.

Esta técnica ha demostrado ser efectiva a la hora de tratar biopelículas formadas por bacterias aeróbicas, pero inefectiva para biopelículas con bacterias anaeróbicas como las BSR. Además, se ha comprobado que el uso de la CP combinado con recubrimientos protectores puede ser eficaz para controlar la biocorrosión en tuberías sometidas a determinados ambientes⁵⁷.

2.3. MÉTODOS DE MONITOREO

Esta etapa es crucial en un proceso de control de la MIC, puesto que permite corroborar si los tratamientos empleados en el sistema para mitigar la biocorrosión dieron resultado. Algunas técnicas pueden detectar una modificación específica de en el sistema debido a la presencia de determinados microorganismos para posteriormente hacer suposiciones sobre los procesos corrosivos. Otros miden un parámetro electroquímico y luego realizan suposiciones sobre los organismos presentes.

En cualquier caso, teniendo la suficiente información sobre las condiciones de operación del sistema, se puede realizar una evaluación precisa del rendimiento de los tratamientos utilizando alguno de los procedimientos descritos en este numeral.

2.3.1. Métodos para Medir la Pérdida Física del Metal

Estas técnicas se basan en la medición del cambio en la geometría física de un material que se encuentra expuesto a condiciones corrosivas, a través de un elemento sensor que permita medir dichos cambios o mediante una evaluación directa.

⁵⁷ VIDELA, Hector. "Prevention and Control of Biocorrosion". Elsevier Science Ltd, 2002.

Cupones de Corrosión

Son placas metálicas, hechas de diferentes aleaciones, formas y tamaños, que se ubican dentro de una corriente de flujo y se remueven periódicamente con el fin de determinar la velocidad de corrosión mediante la comparación de su masa antes y después de la exposición al medio investigado; es recomendable que el tiempo de exposición sea de por lo menos un mes, para permitir la formación de una biopelícula estable y simular de forma más precisa las condiciones de la tubería⁵⁸. Comúnmente, poseen una superficie que facilita la medición de las pérdidas de peso, sin embargo, existen cupones que poseen otro tipo de superficies los cuales son usados para distintas funciones como análisis microbiológicos o exámenes microscópicos (Figura 24).⁵⁹

Figura 24. Ejemplos de Cupones de Corrosión.



Fuente: Tomada y Modificada de Alabama Specialty Products, Inc. Corrosión Coupons. <http://www.alspi.com/coupons.htm>

⁵⁸ BLACKBURN, Freeman. "Non-Bioassay Techniques for Monitoring MIC". NACE International, Houston, 2004.

⁵⁹ LICINA, George. "Monitoring Methods for MIC". NACE International, Houston, 2007.

Ya que el MIC es un proceso de corrosión localizada, en muchos casos la pérdida de peso no constituye un buen método para indicar problemas asociados a esta, y a pesar de que la pérdida de material puede cobrar importancia en el monitoreo de biocorrosión al evaluar la presencia de microorganismos y caracterizar el número de “cavernas” o “pits”, nuevos cupones más complejos para monitorear las biopelículas se han desarrollado con el fin de superar estas dificultades, basados en la influencia de las biopelículas sobre la transferencia de calor entre el dispositivo y el medio (que disminuye a medida que aumenta la acumulación de material orgánico) o en la fricción generada por el fluido (que aumenta con el grosor de la biopelícula).⁶⁰

Es necesario aclarar que tanto la correcta ubicación de los cupones en lugares donde se presente corrosión, así como la evaluación previa de las condiciones ambientales y del material, son factores clave a la hora de diseñar un buen programa de monitoreo por cupones.

Sondas de Resistencia Eléctrica

Tienen como objetivo determinar la pérdida másica del material a partir de la medición del aumento en la resistencia eléctrica de una sonda metálica, causado por la disminución de su área transversal.

El procedimiento se vale de unos algoritmos, generalmente suministrados por el fabricante, usados con el fin de convertir los datos de resistencia eléctrica en pérdidas de masa, para posteriormente evaluar los resultados obtenidos a través del tiempo.

Según Licina (2007) medidas erróneas por parte de este método se generan principalmente debido a dos causas: primero, ciertos precipitados eléctricamente conductores pueden recubrir la superficie de la sonda, reduciendo su resistividad, lo que provoca una subestimación de la cantidad de corrosión; y segundo, en

⁶⁰ LITTLE, Brenda y LEE, Jason. “Microbiologically Influenced Corrosion”. Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

lugares donde se presenta una fuerte corrosión localizada su área transversal es disminuida drásticamente, y los resultados tenderán a sobrestimar la cantidad de corrosión.

Inspección Ultrasónica

Esta técnica se basa en la transmisión de ondas sonoras de alta frecuencia a través de las tuberías para determinar cuantitativamente cambios en el espesor de las paredes de estas, y para detectar la presencia de discontinuidades como fracturas y cavernas.

Su alta sensibilidad (que permite la detección de defectos bastante pequeños), así como su gran poder de penetración (la cual facilita la localización de fallas en superficie y debajo de ella) convierten a la inspección ultrasónica en una herramienta eficiente para el monitoreo del MIC; no obstante sus principal desventaja radica en el requerimiento de personal especializado para operar los equipos y desarrollar los procedimientos de monitoreo.⁶¹

2.3.2. Métodos para Medir las Propiedades Electroquímicas de las Superficies Corroídas

Dentro de esta categoría están incluidas técnicas que se fundamentan en el control de una variable electroquímica ya sea el potencial o la corriente de corrosión, a través de la interfase entre la superficie metálica y un fluido conductor, y la medición de la otra variable no controlada.

Medidas de Potencial Redox

El potencial de oxidación-reducción o potencial redox se basa en el uso de un electrodo hecho de un material inerte, como el platino, para dar indicios sobre la

⁶¹ BORENSTEIN, Susan. "Microbiologically Influenced Corrosion Handbook". Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 1994.

capacidad oxidativa que posee un electrolito e incluso su corrosividad, si se cuenta con la calibración adecuada.

Sin embargo, se ha demostrado que en casos de MIC para un mismo potencial redox, se pueden presentar diferentes grados de corrosión en distintos materiales que están siendo sometidos a las mismas condiciones ambientales, y por lo tanto su uso se ha visto limitado cuando se trata con corrosión microbiológica. No obstante, esta técnica puede ser útil si es usada en combinación con otros métodos como las medidas de potencial de corrosión, o la resistencia de polarización lineal.⁶⁰

Medidas de Potencial Circuito Abierto o Potencial de Corrosión

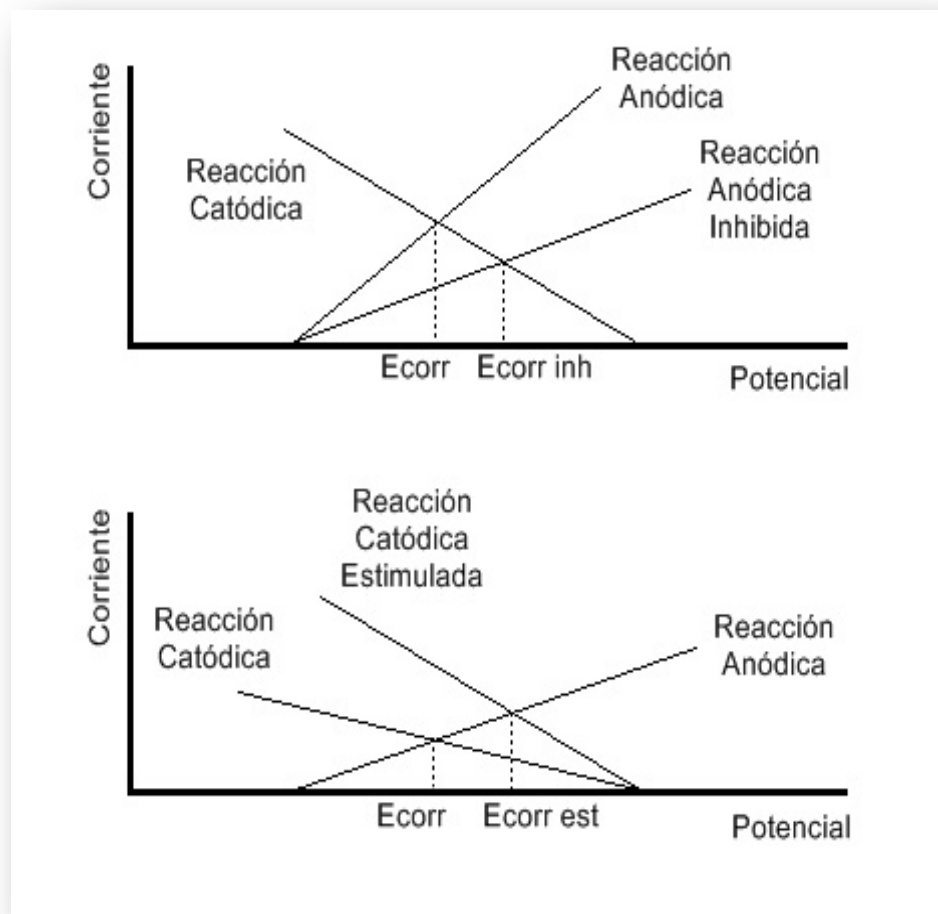
El proceso de medición del E_{corr} generalmente resulta sencillo y se basa en el uso de electrodos de referencia, los cuales no deben ser afectados por la formación de biopelículas, y un voltímetro de alta impedancia interna, con el fin de construir curvas de polarización que permitan seguir los cambios ocurridos a este; no obstante la interpretación de los resultados obtenidos a partir de esta técnica es bastante compleja, en especial si está asociada a procesos de MIC⁶².

Otra limitación que posee este método es su dependencia de otras medidas y datos para dar conclusiones definitivas sobre las reacciones que se están llevando a cabo; por ejemplo, cambios positivos en el E_{corr} pueden deberse a una reducción de la velocidad de reacción anódica, a una estimulación de la tasa de reacción catódica o a la presencia de ambos procesos al mismo tiempo (ver figura 25) y si el único método disponible es la medida de potencial de corrosión, no sería posible asegurar cuál de los dos casos está ocurriendo.⁶³

⁶² VIDELA, H; BIANCHI, F; FREITAS, M. M. S.; CANALES, C. G.; WILKES, J. "Monitoring Biocorrosion and Biofilms in Industrial Waters: A Practical Approach". American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

⁶³ SCHMITT, G. "Sophisticated Electrochemical Methods for MIC Investigation and Monitoring". Materials and Corrosion 48. 1997.

Figura 25. Cambio en el potencial de corrosión debido a cambios en las reacciones anódicas y catódicas.

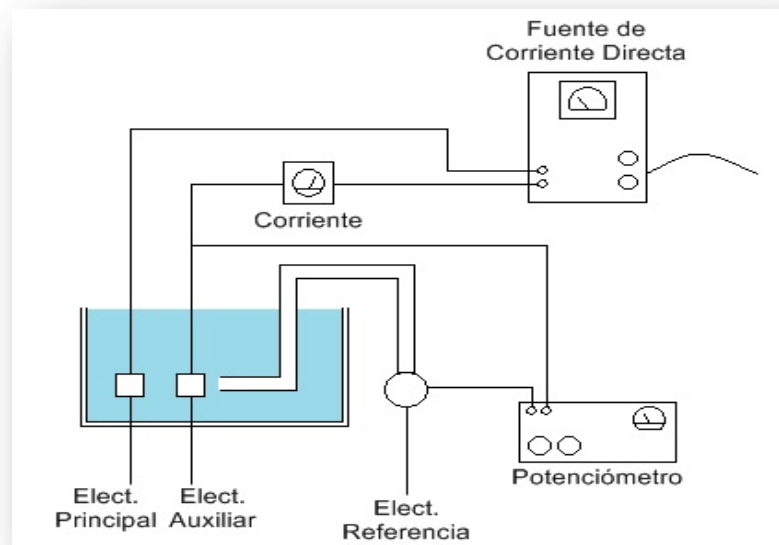


Fuente: Tomada y modificada de SCHMITT, G. "Sophisticated Electrochemical Methods for MIC Investigation and Monitoring". Materials and Corrosion 48. 1997.

Método de Resistencia de Polarización Lineal

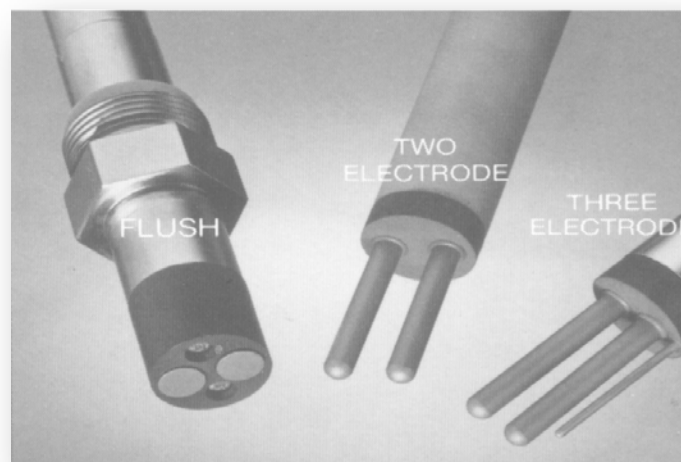
Esta técnica es usada para determinar las tasas de corrosión uniforme a partir de la medición de la variación de la corriente eléctrica en cierto número de electrodos idénticos al someterlos a un determinado potencial eléctrico; la Figura 26 enseña un montaje común para la prueba de RPL y la Figura 27 muestra algunos de los electrodos más usados.

Figura 26. Circuito típico de conexión para el método de RPL.



Fuente: Tomada y modificada de SCHMITT, G. "Sophisticated Electrochemical Methods for MIC Investigation and Monitoring". Materials and Corrosion 48. 1997.

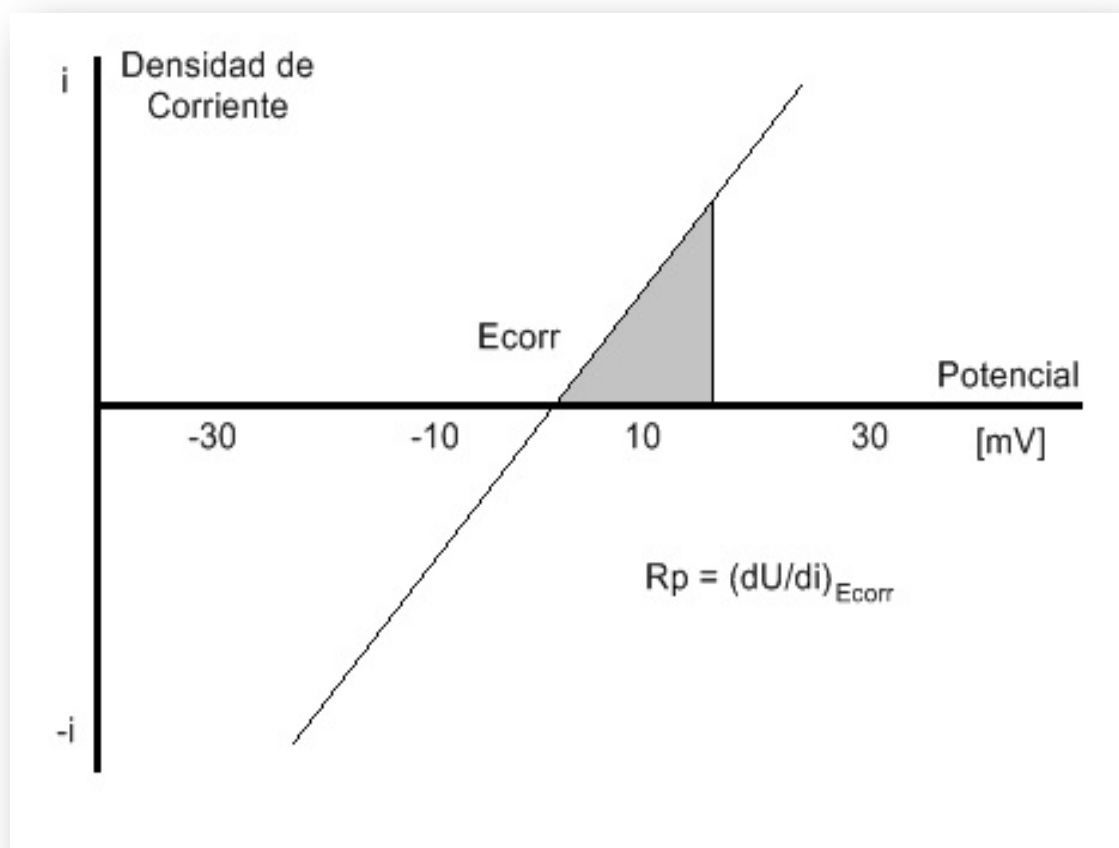
Figura 27. Tipos de electrodos usados en la RPL.



Fuente: Tomada y modificada de LICINA, George. "Monitoring Methods for MIC". NACE International, Houston, 2007.

El método está basado en la suposición de que la pendiente de las curvas de polarización cuando están cercanas al potencial de corrosión (entre 10 – 30 mV) es constante, es decir, que la relación entre la corriente y el potencial es lineal (Figura 28); dicha pendiente es conocida como resistencia de polarización lineal (R_p), y varios estudios a través de los años han demostrado que existe una relación inversamente proporcional entre esta y la tasa de corrosión. Sin embargo, hay que aclarar que esta relación, solo es válida para condiciones de transferencia de electrones y no para condiciones controladas por difusión, como es el caso de la corrosión microbológica.^{61 63}

Figura 28. Ilustración de la RPL en una gráfica Potencial vs Corriente.



Fuente: Tomada y modificada de DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

Además, otra de sus principales limitaciones es el hecho de que los datos obtenidos son útiles para determinar corrosión uniforme, pero menos adecuados para el monitoreo de fenómenos de corrosión localizada, incluida la MIC⁶⁴.

Por último, también se han encontrado errores significativos en las mediciones en sistemas que tienen tasas de corrosión demasiado altas o que poseen electrolitos de muy baja conductividad, haciendo necesario el uso de factores de corrección experimentales con el fin de ajustar los datos y aumentar la exactitud y la precisión del método.^{63 64}

Electrodos Galvánicos y Amperímetros de Resistencia Cero (ZRA)

Esta técnica se basa en el uso de electrodos galvánicos, constituidos por dos series de discos de acero inoxidable, para monitorear la influencia que ejerce la actividad microbiana y determinar la presencia de corrosión localizada sobre la superficie de los materiales (Figura 29).

Su funcionamiento consta de dos periodos, en el primero un set de discos es polarizado durante una hora diaria por varios días mientras el otro permanece a las mismas condiciones, el incremento en la cantidad de corriente eléctrica necesaria para que los dos alcancen la misma polaridad será un indicativo de la presencia de biopelículas en el sistema.

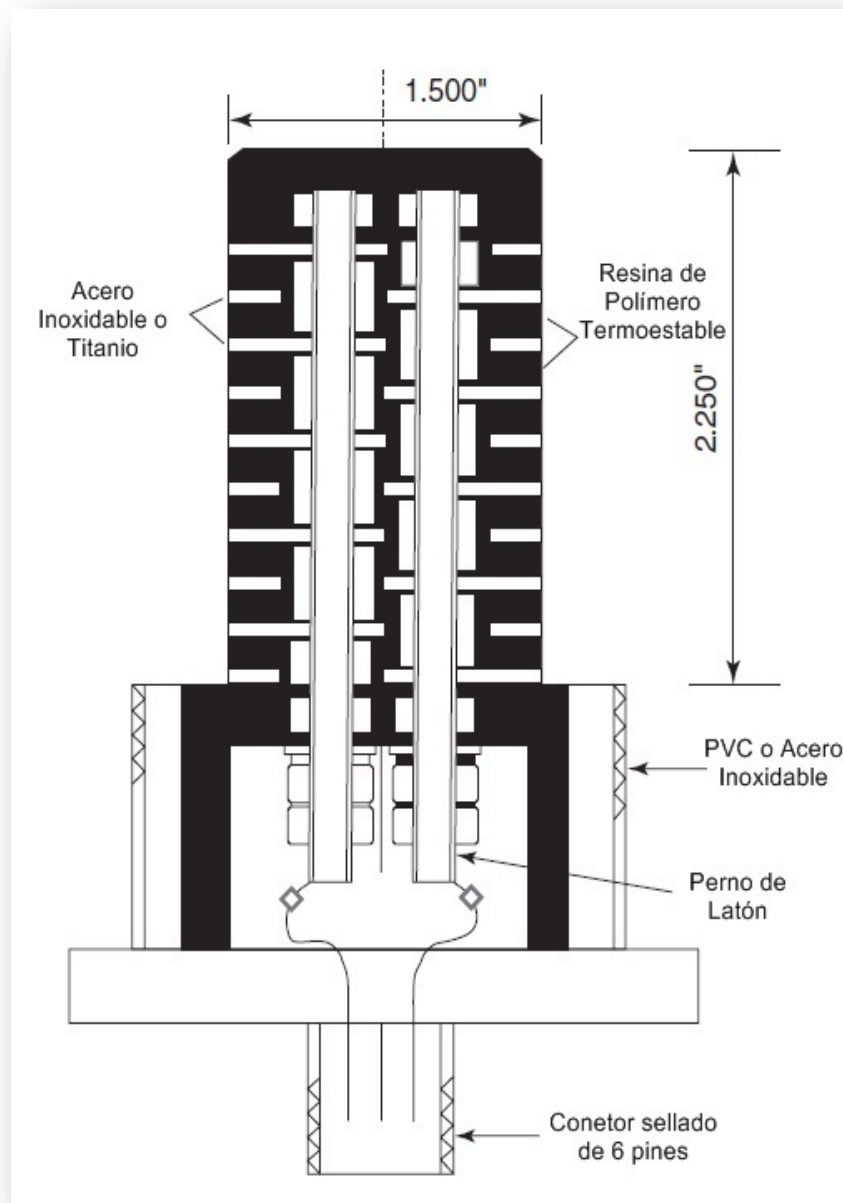
En el segundo periodo, los sets son conectados eléctricamente a través de un amperímetro de resistencia cero, y la corriente eléctrica generada es monitoreada con el fin de hallar incrementos en esta, los cuales también son indicio de la generación de biopelículas.

Cabe mencionar que este método solo puede indicar el riesgo de MIC cualitativamente, alertando cuando las biopelículas posean determinada corriente, para que el sistema sea limpiado o sometido a tratamientos químicos; por lo tanto,

⁶⁴ LITTLE, Brenda y LEE, Jason. "Microbiologically Influenced Corrosion". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

no tiene la capacidad de medir ninguna propiedad relacionada a las biopelículas o a la corrosión en sí.⁶⁴

Figura 29. Electrodo Galvánico.

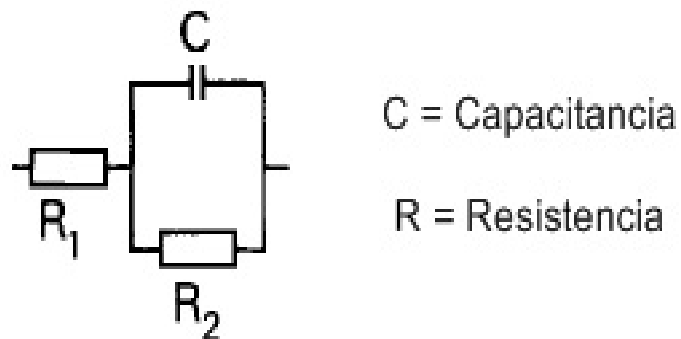


Fuente: Tomada y modificada de DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

En la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica una señal de corriente alterna (CA) de baja amplitud es aplicada a un electrodo de prueba con el fin de determinar una respuesta como función de la frecuencia de la señal; la EIS se caracteriza por proveer información de diferente tipo a la dada por los métodos discutidos anteriormente ya que mediante su uso es posible analizar y caracterizar el sistema de corrosión presente en el medio a un determinado potencial o corriente eléctrica. Con el propósito de predecir el comportamiento de la impedancia y su relación con el proceso de corrosión, los datos correspondientes a la respuesta de la frecuencia son asociados a un modelo de la situación electroquímica en las interfases de un sistema de corrosión (ambiente/metal/biopelícula en el caso de la MIC), el cual se expresa por lo general en términos de un circuito eléctrico equivalente, siendo el más simple el circuito equivalente de Randle⁶⁵, esquematizado en la figura 30, que consta de la resistencia del electrolito R_1 conectada en serie con una unidad RC que incluye la capacitancia de las capas nombradas arriba C y la resistencia de polarización R_2 .

Figura 30. Circuito eléctrico equivalente.



Fuente: Tomada y modificada de DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

⁶⁵ SCHMITT, G. "Sophisticated Electrochemical Methods for MIC Investigation and Monitoring". Materials and Corrosion 48. 1997.

En la práctica, hay problemas al usar la EIS para estudiar la MIC, ya que la técnica no es necesariamente de fácil aplicación, y los datos generados son difíciles de interpretar⁶⁶.

El modelo equivalente de los procesos electroquímicamente relevantes mencionado anteriormente tiene que ser encontrado de forma obligatoria, sin embargo, estos procesos y su interrelación son bastante complejos lo que convierte el desarrollo de un buen modelo en una tarea bastante difícil.

Análisis de Ruido Electroquímico (ENA)

En este análisis se miden (a través de un amperímetro de resistencia cero (ZRA) y un voltímetro de alta impedancia respectivamente) y posteriormente se analizan estadísticamente las características de las fluctuaciones en la corriente o en el potencial eléctrico, producidas cuando dos electrodos idénticos sumergidos en el mismo medio son sometidos a condiciones de corrosión; aunque normalmente son utilizados tres electrodos, ya que para medir las fluctuaciones del potencial eléctrico se necesita el uso de un electrodo de referencia el cual puede ser un electrodo saturado (como el electrodo de calomelanos) o simplemente un electrodo del mismo material que los otros dos (Figura 31) (Little y Lee, 2007).

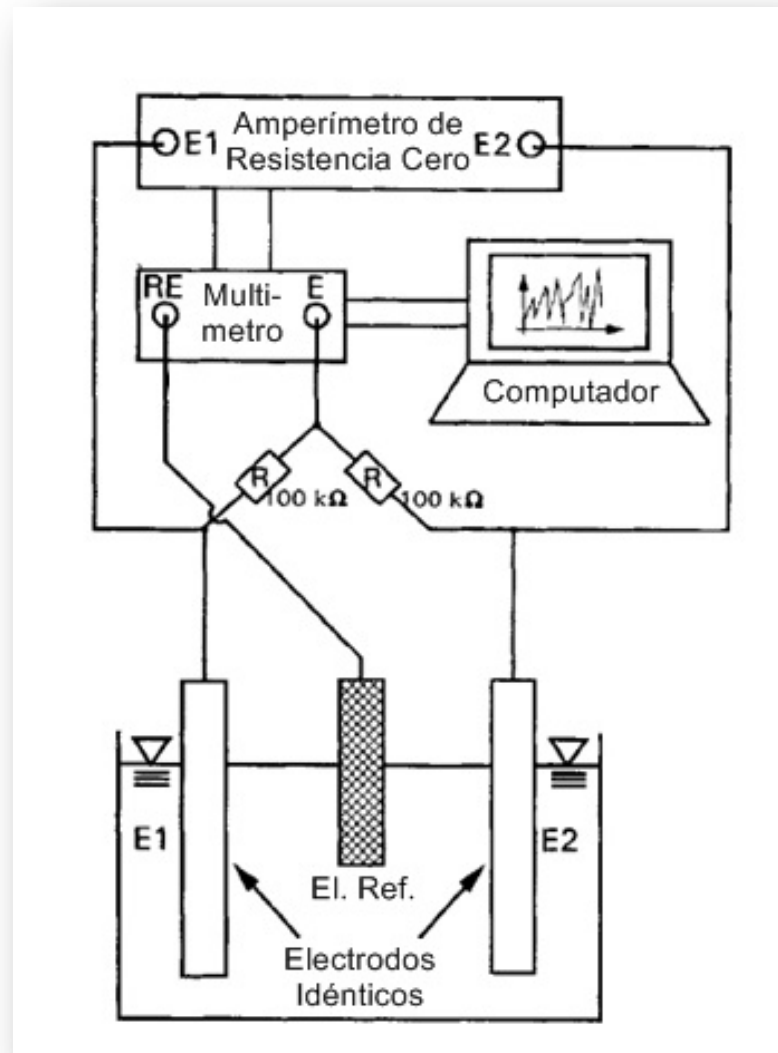
Dichas fluctuaciones están directamente relacionadas con procesos anódicos y catódicos, por lo cual su estudio proporciona una visión de los mecanismos que gobiernan la corrosión en el sistema.⁶⁷

Su principal ventaja radica en el hecho de que es una prueba independiente del uso de señales exteriores, que pueden afectar de manera negativa el sistema de corrosión y las actividades microbianas presentes⁶⁸.

⁶⁶ TUOVINEN, Olli y CRAGNOLINO, Gustavo: "A Review of Microbiological and Electrochemical Techniques in the Study of Corrosion Induced by Sulfate-Reducing Bacteria". Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986.

⁶⁷ LICINA, George. "Monitoring Methods for MIC". NACE International, Houston, 2007.

Figura 31. Montaje típico para el análisis de ruido electroquímico.



Fuente: Tomada y modificada de DAVIS, J. R. "Corrosion Understanding the Basics". ASM International, Ohio, 2000.

Además, resultados de investigaciones reportados en la literatura han determinado que es posible monitorear la corrosión y distinguir si se trata de una corrosión general o localizada.

⁶⁸ MANSFELD, Florian y XIAO, Hong; "Electrochemical Techniques for Detection of Localized Corrosion Phenomena". American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

Por estos motivos en los últimos años la aplicación de esta técnica en campo y en laboratorio presentó un aumento considerable (Schmitt, 1997).

2.3.3. Otros Métodos

En este grupo se encuentran los métodos que analizan los subproductos generados por los procesos de corrosión microbiológica.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido, el cual para formar imágenes utiliza un haz de electrones en vez de un haz de luz, se analizan muestras con el fin de determinar la distribución y morfología de los microorganismos presentes y examinar detalladamente la superficie la superficie de los metales corroídos.

Antes de ser evaluadas con la SEM, las muestras deben ser preparadas, sometiéndolas a una fijación con glutaraldehído, luego a una remoción de agua, acetona y sales a través de una serie de lavados, y por último, deben ser cubiertas con un recubrimiento metálico puesto que la mayoría de microscopios electrónicos de barrido necesitan que los ejemplares sean eléctricamente conductores.⁶⁹

Esto constituye una gran limitación de esta técnica, puesto que la preparación anteriormente descrita implica una extensa manipulación de la muestra que en últimas podría disminuir la precisión de los resultados logrados⁷⁰. Además, la

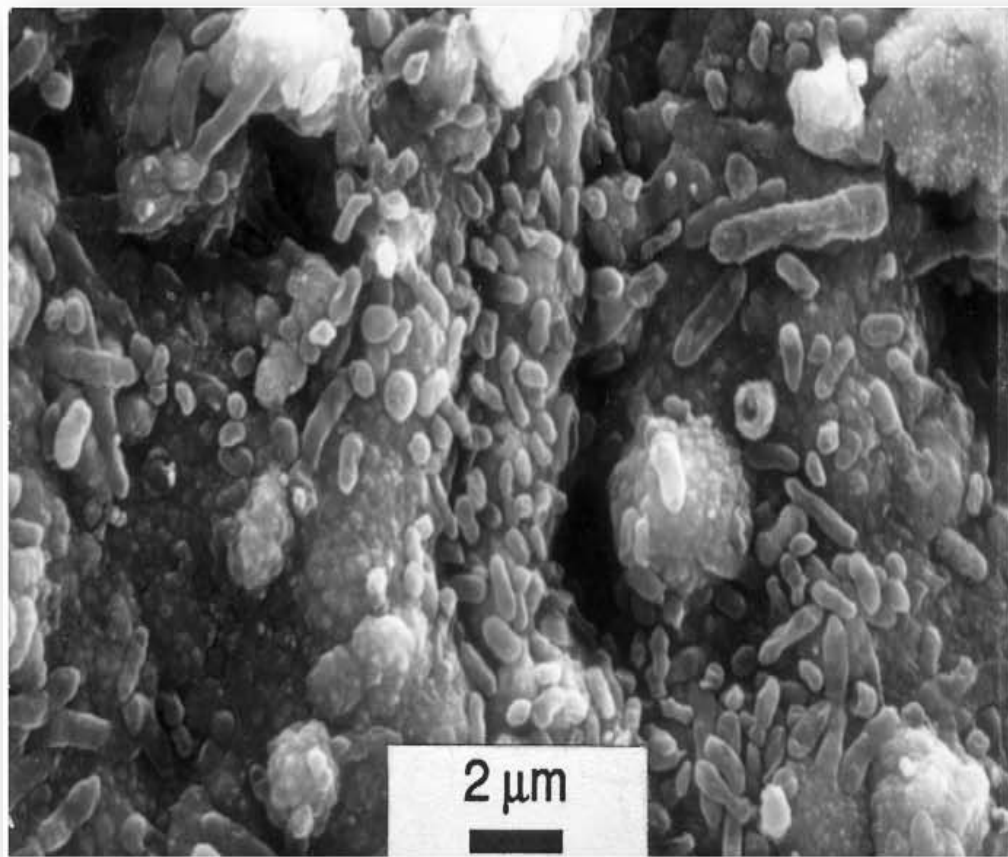
⁶⁹ LITTLE, Brenda y WAGNER, Patricia. "Microbiologically Influenced Corrosion". Houston: NACE International, 1997.

⁷⁰ WAGNER, Patricia y RAY, Richard. "Surface Analytical Techniques for Microbiologically Influenced Corrosion – A review". American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

manipulación de los equipos y el reconocimiento de las bacterias requieren de personal muy experimentado, lo cual reduce su aplicabilidad en campo.⁷¹

Cabe destacar además, que trabajos anteriores han demostrado que la presencia en el medio de bacterias y otros tipos de organismos microbianos no es necesariamente un indicativo de su relación con los procesos de corrosión.

Figura 32. Imagen SEM de bacterias dentro de capas de sulfuro sobre la superficie de una aleación cobre-níquel (90/10).



Fuente: Tomada y Modificada de LITTLE, Brenda y LEE, Jason. "Microbiologically Influenced Corrosion". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

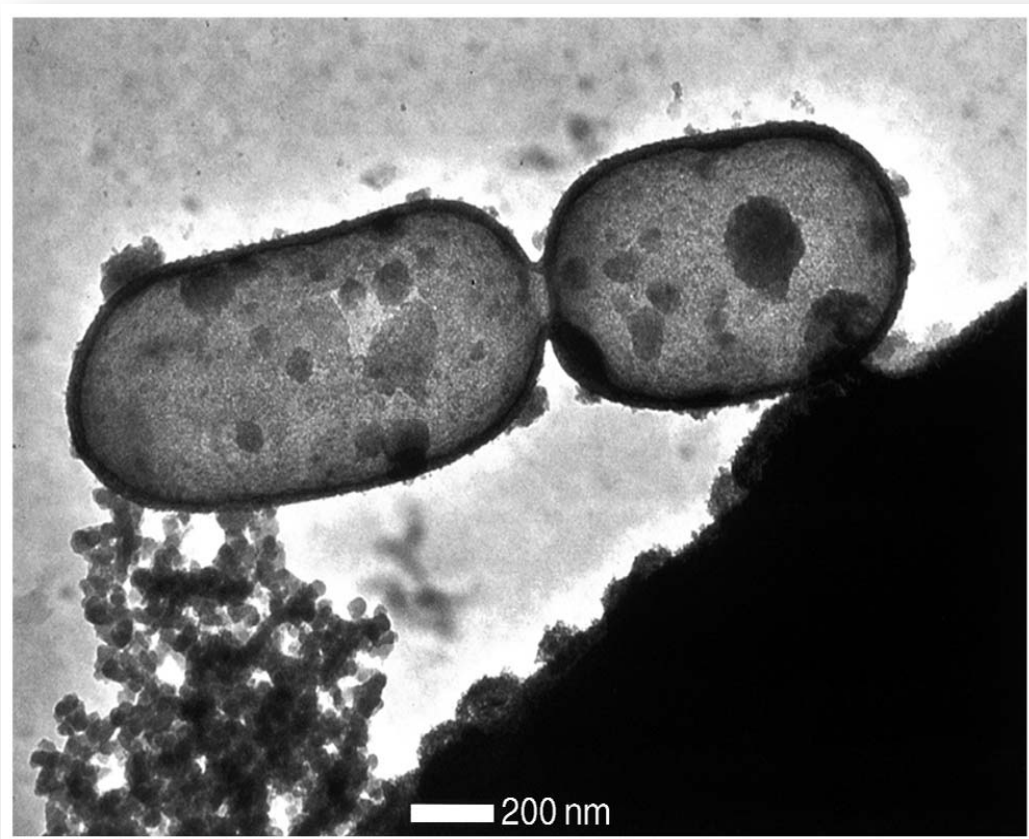
⁷¹ SOOKNAH, Reeta. PAPA VINASAM, Sankara. REVIE, Winston. "Monitoring Microbiologically Influenced Corrosion: A Review of Techniques", NACE International, Ottawa – Canadá, 2007.

Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

Este método es semejante a la SEM, sin embargo, difiere de ella en la presentación de las muestras: posterior a la preparación, deben ser inmersas en una resina y divididas en secciones muy finas (de aproximadamente 0,1-2 mm); finalmente estas secciones finas son las que se evalúan⁶⁹.

En cuanto a su alcance y limitaciones, son los mismos que en la SEM, puesto que están basados en el mismo principio.

Figura 33. Imagen TEM de *Pseudomonas putida* después de la remoción del exceso de humedad.



Fuente: Tomada y Modificada de LITTLE, Brenda y LEE, Jason.
"Microbiologically Influenced Corrosion". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

Microscopía de Barrido Confocal (CLSM)

Este tipo de microscopía crea de imágenes 3D del objetivo, valiéndose del uso de luz láser, la cual permite la proyección de planos horizontales de la muestra en determinados intervalos de tiempo, que luego serán superpuestos para crear una vista multidimensional. La CLSM es usada para el monitoreo tanto de las biopelículas y las actividades metabólicas presentes en estas, como del crecimiento y la forma de las cavernas formadas por la biocorrosión en la superficie del material.⁷²

Los problemas más presentados a la hora de aplicar esta tecnología en los casos de MIC son varios. El uso de luces láser de alta potencia puede afectar de manera negativa el crecimiento de las bacterias en la muestra, además el método presenta dificultades a la hora de escanear objetos muy gruesos y opacos o que tengan superficies curvas, adicionalmente el tiempo que le toma generar imágenes de alta calidad es bastante grande.

Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

Los microscopios de fuerza atómica constan de una microsonda, la cual está acoplada a una palanca microscópica flexible, que permite escanear la topografía de las células en la superficie mediante la medición (a través de un rayo láser) de las desviaciones causadas por las fuerzas de van der Waals sobre la microsonda. Imágenes de resolución nanométrica son generadas que facilitan la visualización de material vivo en la muestra con gran exactitud, sin embargo, información referente a la composición de la muestra no puede ser obtenida a través de este método.⁷²

⁷² LITTLE, Brenda y LEE, Jason. "Microbiologically Influenced Corrosion". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

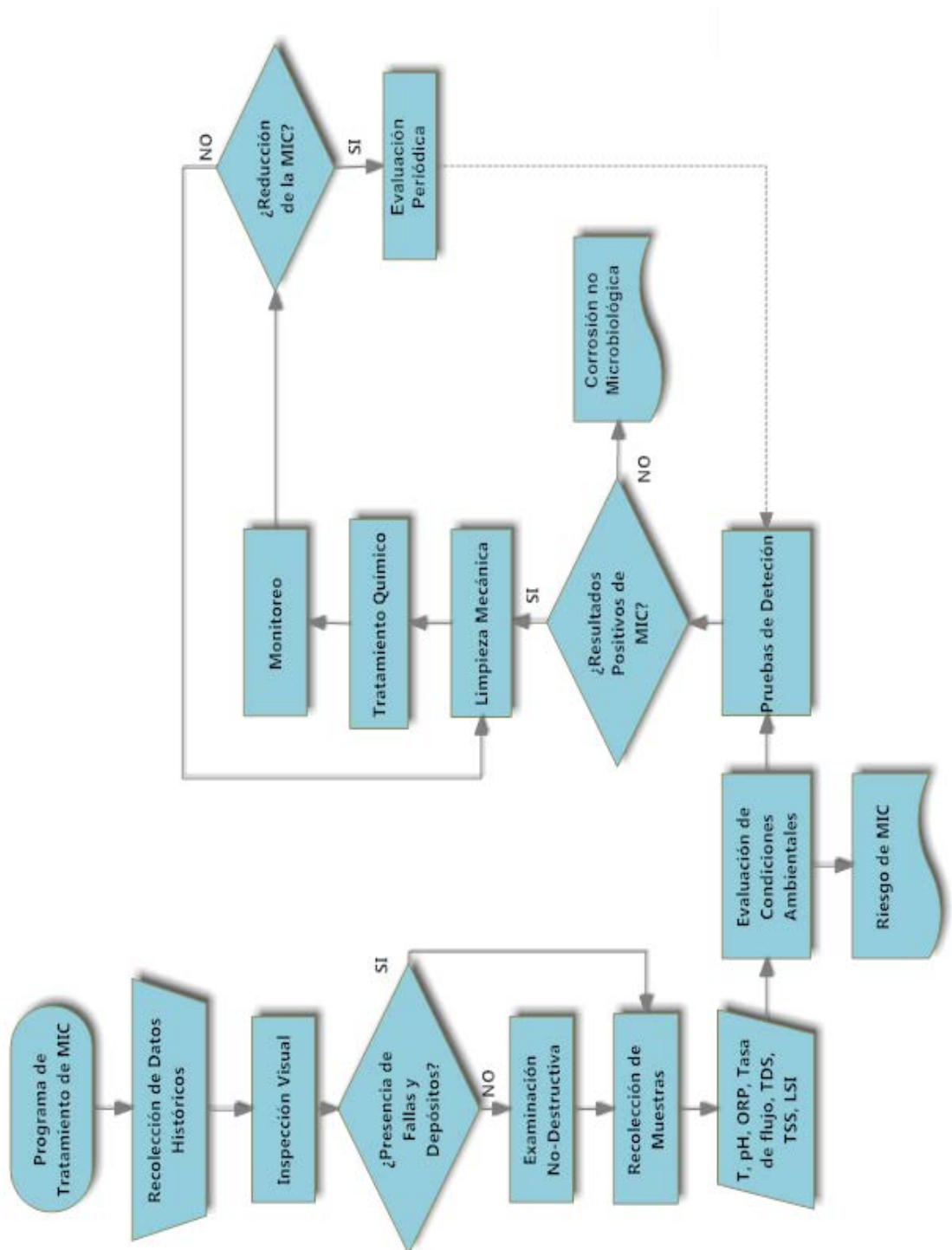
3. METODOLOGIA PARA LA DETECCIÓN Y EL CONTROL DE LA MIC EN CAMPOS PETROLÍFEROS

En este capítulo se presenta un sistema integrado de tratamiento de la MIC, el cual fue planteado por los autores como esquema de diagnóstico, evaluación y mitigación de la corrosión microbiológica. Un tratamiento adecuado a este problema requiere una serie de diversas tareas individuales que al ser realizadas en conjunto resulten en la reducción de los problemas asociados a la MIC. Todos y cada uno de los procedimientos aquí plasmados deben ser implementados con el fin de maximizar la efectividad en el tratamiento. Estos procedimientos propuestos fueron escogidos de acuerdo a ciertos parámetros como su uso en algunos trabajos relacionados a la industria del petróleo y gas y facilidad de implementación. La representación esquemática del sistema integrado es presentada en la Figura 34. A continuación se explicará de manera detallada cada uno de los pasos que hacen parte del sistema anteriormente mencionado.

3.1. RECOLECCIÓN DE DATOS

Antes de realizar cualquier proceso de investigación, no sólo en el ámbito de la corrosión, el primer paso debe ser el de realizar una recopilación de información histórica que actúe como una ficha clínica que permita analizar cómo los eventos o fenómenos ocurridos anteriormente se relacionan con el problema a evaluar. De esta forma, cuando se sospecha una posible ocurrencia de MIC en el sistema de trabajo, es importante recolectar toda la información concerniente a la manufactura y el servicio de los elementos afectados, para esto es bueno valerse de bases de datos de los fabricantes y los registros de la compañía; la fecha, los materiales y los procesos llevados a cabo para la creación de dichos elementos, así como las condiciones de trabajo y registros históricos de reparaciones y mantenimientos permitirán indicar si hay anomalías que afecten negativamente el desempeño normal de las piezas evaluadas.

Figura 34. Sistema de tratamiento de la MIC



También es necesario saber si en el sistema se presentaron procesos de corrosión en el pasado, y de ser así, se debe obtener la mayor cantidad de datos relacionados con los tratamientos llevados a cabo para remediarlos, puesto que esta información puede ser útil para establecer una posibilidad de que se haya presentado una corrosión microbiológica con anterioridad.

3.2. INSPECCIÓN VISUAL

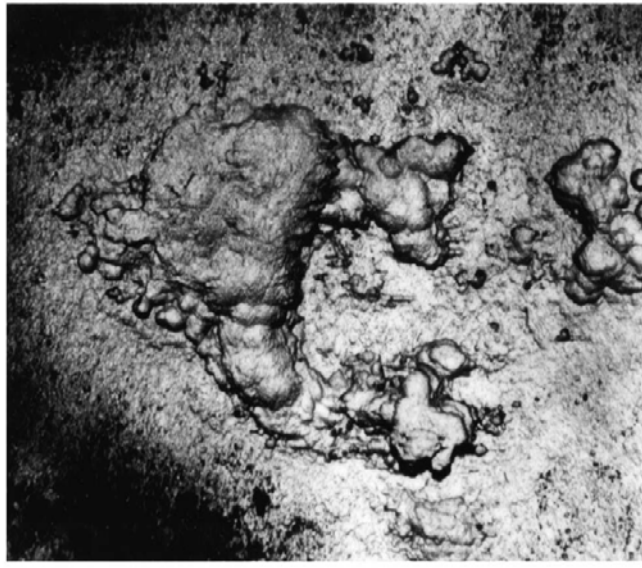
Una vez concluida la etapa de recolección de datos, se debe realizar una inspección visual de los materiales, la cual corresponde a una de las técnicas más básicas pero importantes dentro del proceso de detección de la MIC, puesto que la información obtenida, especialmente en estas etapas tempranas, puede ser bastante útil en un futuro como información que permita concluir en un diagnóstico de corrosión microbiológica.

Esta técnica está basada en revisiones que son hechas por personal humano, que sin la asistencia de microscopios o lentes de gran aumento, busca encontrar determinadas características físicas que pueden ser correlacionadas con una posible actividad microbiológica.

Cabe aclarar que aunque no existen características fijas que permitan dar un juicio definitivo sobre la presencia de corrosión microbiológica, algunos autores como Pope (1990) hicieron un listado de algunos criterios, que según la experiencia, permiten considerar una posible presencia de este fenómeno⁷³; como es el caso de ciertos cráteres en la superficie rodeados por metal sin corroer (Figura 35) y/o líneas en hendiduras localizadas de forma paralela al eje longitudinal de la pieza metálica (Figura 36).

⁷³ LITTLE, Brenda J. LEE, Jason S. "Microbiologically Influenced Corrosion" John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.

Figura 35. Formación de cráteres en una pieza de acero al carbono.



Fuente: Tomada y Modificada de LITTLE, Brenda y LEE, Jason.
“Microbiologically Influenced Corrosion”. Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

Figura 36. Presencia de líneas en hendiduras paralelas al eje longitudinal de una pieza de acero al carbono.



Fuente: Tomada y Modificada de LITTLE, Brenda y LEE, Jason. “Microbiologically Influenced Corrosion”. Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.

3.3. EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS

Estos exámenes suponen un paso indispensable en la valoración de cualquier proceso corrosivo que pueda presentarse sea de tipo microbiológico o no, por este motivo este paso no debe ser pasado por alto en un proceso de evaluación de MIC.

Estos procedimientos corresponden a un grupo de técnicas usadas normalmente sobre los materiales con el fin de detectar fallas y defectos que no pudieron ser vistos mediante la inspección visual, sea porque son de un tamaño muy pequeño o porque se ubican dentro del material. Borenstein (1994) nombra algunas técnicas usadas con frecuencia en la industria:

- Inspección de partículas magnéticas de metales ferrosos.
- Inspección ultrasónica.
- Inspección radiográfica.
- Inspección de emisión acústica.

La principal característica de estas técnicas es que pueden ser útiles para detectar ciertos síntomas de corrosión sin alterar las propiedades físicas del material, razón por la cual son ampliamente usadas en esta etapa del proceso.

3.4. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

El proceso de muestreo es uno de los pasos más importantes y delicados de la metodología, ya que estas muestras serán la materia prima para el diagnóstico directo de la corrosión microbiológica. Éstas pueden provenir del medio acuoso (las cuales contendrán organismos planctónicos) o de la superficie del material (en las que se encuentran los organismos sésiles), siendo las primeras más importantes para el análisis químico del fluido mientras que las últimas resultan de

mayor utilidad para la realización de conteos bacterianos que indicarán de manera definitiva la presencia de organismos responsables de la MIC.

Debido a que cerca del 90% de los microorganismos presentes en las aguas producidas se encuentran adheridos a la superficie, las muestras provenientes de residuos sólidos son más recomendables en la realización de análisis microbiológicos, puesto que las muestras líquidas de medio acuoso tienden a subestimar la población total bacteriana. Los procedimientos a seguir en la presente metodología son los descritos en la NACE Standard TM0194-2004⁷⁴ para muestras líquidas y la norma ASTM D7464-08⁷⁵ para muestras sólidas, y fueron escogidas debido a su uso específico para análisis microbiológicos en la industria del petróleo y gas. Los procesos referentes al análisis químico del agua están fuera del alcance de esta tesis y por lo tanto no serán explicados.

3.4.1. Muestras Líquidas

Corresponde al tipo de muestra que se toma directamente del medio acuoso que está fluyendo por el sistema a evaluar.

Consideraciones

Se debe solicitar siempre la presencia de operadores del campo cuando se van a realizar los muestreos, ya que ellos pueden proveer información muy importante con respecto a las condiciones del sistema, y pueden facilitar la selección de sitios de muestreo adecuados. Para minimizar cambios en las poblaciones bacterianas, las muestras deben ser analizadas lo más pronto posible. Si se presenta una demora de más de una hora para realizar dicho análisis, el uso de contenedores plásticos quedará descartado; y en el caso de que la demora sea mayor a cuatro horas las muestras deberán ser refrigeradas a 40°F.

⁷⁴ NACE Standard TM0194-2004. "Field Monitoring of Bacterial Growth in Oil and Gas Systems". (Houston: NACE, 2004).

⁷⁵ ASTM Designation D7464-08. "Standard Practice for Manual Sampling of Liquid Fuels, Associated Materials and Fuel System Components for Microbiological Testing". (West Conshohocken: ASTM, 2008).

Con respecto a la frecuencia de muestreo, esta depende de la operación del sistema, ya que algunos pueden requerir muchos muestreos al azar durante varios días, mientras que en otros casos, estos muestreos son realizados en lapsos de tiempo muy amplios. Además, para tener un entendimiento completo de la ecología del medio, se debe evaluar la totalidad del sistema. De esta manera, las muestras pueden ser tomadas de los puntos principales de muestreo, los cuales para sistemas de producción pueden ser:

- ✓ Tanques de descarga de agua
- ✓ Separadores
- ✓ Líneas de flujo
- ✓ Toma muestras de cabeza de pozo

Para sistemas de inyección de agua, los principales puntos de muestreo son:

- ✓ Tanques de almacenamiento de agua
- ✓ Pozos de inyección

Es necesario indicar que estos corresponden a los puntos básicos, y no necesariamente deben ser los únicos sitios muestreados, los cuales pueden ser escogidos de acuerdo a las necesidades de la zona evaluada⁷⁶. Otra recomendación para evitar la contaminación de las muestras, es el uso de guantes quirúrgicos por parte del operador, los cuales deberán ser reemplazados o desinfectados con alcohol al 70%. Finalmente, durante tratamientos con biocidas, muestras adicionales deben ser tomadas antes y después de estos.

Equipos y Reactivos

Los equipos usados son bastante comunes, y la única precaución que se debe tener en cuenta es la selección de elementos contenedores adecuados para el tipo

⁷⁶ SMITH, J.P. "Bacteria Mitigation and Monitoring in IIPACO'S Waterfloods and Production Facilities" Proceedings Indonesian Petroleum Association, 1984.

de material muestreado, de tal manera que no ocurran interacciones entre estos que puedan afectar la integridad de alguno de los dos:

- ✓ Frascos contenedores de vidrio estéril, polietileno o polipropileno (en caso de no contar con elementos estériles, se pueden utilizar frascos nuevos).
- ✓ Guantes quirúrgicos.
- ✓ Alcohol, de grado técnico mayor o igual a 70%, metanol, etanol o isopropanol.

Procedimiento

A continuación se muestran los pasos a seguir para realizar la toma de muestras líquidas en un sistema (tuberías o cualquier equipo de superficie):

- 1) Abrir la válvula y permitir el flujo de agua por algunos minutos.
- 2) Realizar un lavado preventivo del contenedor usando agua del sistema.
- 3) Llenar el frasco totalmente y cerrarlo utilizando un tapón de rosca.
- 4) Etiquetar el contenedor y almacenarlo en un lugar oscuro.

3.4.2. Muestras Sólidas

Son muestras tomadas de la superficie metálica que se está evaluando. Son bastante importantes a la hora de realizar análisis microbiológicos debido a que en éstas se encuentra la mayor cantidad de microorganismos presentes del sistema.

Consideraciones

Antes de empezar, todos los equipos para almacenar las muestras deben ser esterilizados de la siguiente manera: primero se limpian con almohadillas absorbentes teniendo especial cuidado de remover todo tipo de residuo sólido o líquido, después se realiza un lavado con alcohol, llenando $\frac{1}{4}$ o $\frac{1}{3}$ de los recipientes con alcohol y sacudiéndolos por 30 segundos, por último se remueve el alcohol de los dispositivos y se dejan evaporar los residuos remanentes.

Cualquier componente del sistema que sea removible puede ser usado para la extracción de muestras de bacterias sésiles. Cupones de corrosión son un buen ejemplo, así como secciones de tubería removibles (spools).

Estas muestras pueden ser recolectadas mediante el uso de hisopos o de una espátula, los primeros son más apropiados cuando la superficie a tratar no tiene biomasa o residuos visibles sobre ella y los últimos son adecuados en casos en los que residuos o incrustaciones visibles cubren parcial o totalmente la superficie. La composición de la Solución PBS (buffer fosfato salino) que se usará después de la recolección se ilustra en la tabla 4.

Tabla 4. Composición de la Solución PBS

Componente	Cantidad
NaCl	8.7 g
KH ₂ PO ₄	0.4 g
K ₂ HPO ₄	1.23 g
Agua Destilada	1000 mL

El uso de una solución PBS anaeróbica es opcional, sin embargo, varios investigadores han reportado beneficios de usar este tipo de solución anaeróbica en el muestreo de bacterias sésiles para líneas de aceite y gas⁷⁴. Para lograr una solución PBS anaeróbica, a la solución anterior se debe añadir 1 mL de Resazurina 0.1%, 20 mL de L-Cisteína HCl 2.5% y/o 20 mL de ácido ascórbico 5%.

Equipos y Reactivos

Al igual que en el caso anterior se deben seleccionar implementos que no interactúen de manera negativa con las muestras:

- ✓ Recipientes de plástico o vidrio.
- ✓ Almohadillas absorbentes.

- ✓ Guantes quirúrgicos.
- ✓ Espátula de acero inoxidable, de 1.5 por 10 cm para recolectar muestras sólidas.
- ✓ Hisopos de algodón estériles.
- ✓ Alcohol, de grado técnico mayor o igual a 70%, metanol, etanol o isopropanol.
- ✓ Agitador Vortex

Procedimientos

Como se indicó anteriormente existen dos métodos de recolección de muestras sólidas. Las muestras de hisopos son útiles para recolectar muestras de superficies donde no se observan depositaciones visuales en biomasa o residuos, mientras que el uso de espátulas se requiere para residuos o incrustaciones de gran tamaño.

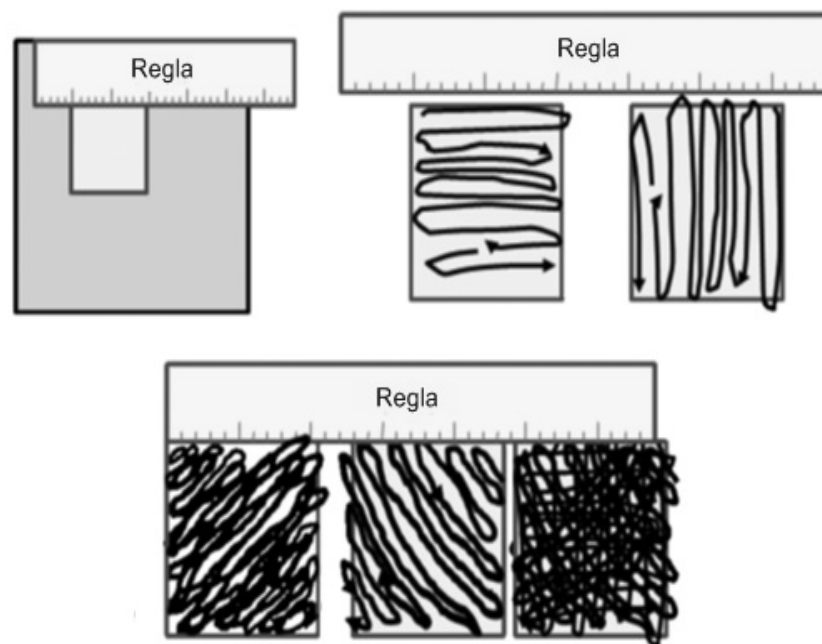
Muestras de hisopos

El proceso a seguir para recolectar muestras sólidas mediante la utilización de un hisopo es bastante sencillo y se explica a continuación:

- 1) Remover el hisopo estéril del empaque.
- 2) Realizar un barrido hacia atrás y hacia adelante a través del área a muestrear. Rotar el hisopo durante el proceso y repetir cuatro veces de la manera como se ilustra en la Figura 37, de arriba abajo, de derecha a izquierda y de forma diagonal; así se asegura un cubrimiento superficial casi total.
- 3) Ubicar el hisopo dentro de un recipiente contenedor.
- 4) Etiquetar el contenedor.
- 5) Para resultados cuantitativos, se debe medir las dimensiones del área evaluada y registrarla en cm^2 .

- 6) Una vez recolectadas las muestras, la biopelícula y sus productos asociados deben ser dispersados completamente mediante el uso de un agitador vortex. En cualquier caso, las bacterias removidas deben ser recolectadas utilizando una solución buffer fosfato salino (PBS), la cual proporciona un ambiente adecuado para mantener la vida de estas.

Figura 37. Procedimiento de toma de muestras mediante hisopos.



Fuente: Tomada y Modificada de ASTM Designation D7464-08. "Standard Practice for Manual Sampling of Liquid Fuels for Microbiological Testing". West Conshohocken: ASTM, 2008.

Muestras de Raspado

- 1) Desinfectar la espátula de acuerdo a lo descrito en las consideraciones.
- 2) Raspar los residuos de la superficie a evaluar y depositarlos en el contenedor de muestras.

- 3) Para resultados cuantitativos, pesar el frasco contenedor.
- 4) Etiquetar el contenedor.
- 5) Una vez terminada la operación, limpiar la espátula.

Al igual que con las muestras de hisopos, se debe hacer la recolección de las bacterias mediante una PBS.

3.5. EVALUACIÓN AMBIENTAL

La evaluación ambiental es un paso indispensable en proceso de detección de la MIC pues, como se ha indicado con antelación, aunque los microorganismos en general posean la capacidad de sobrevivir bajo condiciones realmente adversas (que les permite crecer en ambientes extremos del subsuelo como yacimientos petrolíferos), existen ciertas condiciones ambientales que facilitan su crecimiento y reproducción, lo que hace que ciertos ambientes industriales sean más favorables a presentar corrosiones de este tipo que otros. Por este motivo es imperiosa la evaluación de estas condiciones que permitan evaluar si el sistema en cuestión es susceptible a una corrosión microbiológica o en caso de ya presentarse corrosión, evaluar de forma preliminar la probabilidad de que se trate de la MIC. Una evaluación sencilla de determinadas condiciones operacionales y del medio puede ser suficiente para determinar una precisa valoración de riesgo. Aunque estos métodos de valoración no reemplazan a otras técnicas microbiológicas y químicas en diagnóstico de la MIC, representan una herramienta poderosa a la hora de dar una estimación preliminar sin la necesidad de realizar mediciones complejas y procedimientos elaborados.

3.5.1. Modelo de susceptibilidad al MIC

En el 2008, Sooknah et al, desarrolló un modelo de valoración de la susceptibilidad a la MIC que permitiera predecir de manera cualitativa la

probabilidad de un sistema de presentar este tipo de corrosión al interior de líneas de producción de aceite y gas. Cabe destacar que varias veces se ha calificado a éste como un modelo bastante versátil capaz de ser aplicado a diversos sistemas industriales en distintas condiciones ambientales. Diversos han sido los trabajos realizados utilizando este modelo a la hora de realizar valoraciones de la MIC⁷⁷.

Variables del modelo

El modelo utiliza información de parámetros operacionales y de la química del medio (el agua más precisamente) de manera individual para analizar cómo afecta cada uno en la creación de un ambiente óptimo para la corrosión microbiológica. Esto se hace mediante la asignación de un número de riesgo a cada variable según la manera como ésta afecte al crecimiento bacteriano o al desarrollo de la MIC. Por este motivo se asignan valores desde 0 (a un riesgo mínimo o nulo), hasta 10 (máximo riesgo de MIC) para cada variable independiente. Estas variables, tanto químicas como operacionales pueden dividirse entre aquellas que afectan el crecimiento bacteriano y las que afectan al proceso de corrosión. Es necesario para este propósito, la toma de muestras de agua (como se indica en la sección anterior) para la medición de dichas variables en las zonas de interés para el posterior desarrollo del modelo.

Variables que afectan el crecimiento bacteriano

Los microorganismos presentes en el agua de formación pueden entrar las líneas de producción, mantenerse allí, crecer y reproducirse. De esta misma manera, estos fluidos pueden contaminar a otros equipos conforme avanza el tiempo. Por este motivo es importante analizar las condiciones que afectan directamente a este crecimiento bacteriano para saber qué tan susceptible es el medio para mantener una vida bacteriana activa, referido a la reproducción y al metabolismo que se traduce en corrosión. Aunque existan diversos factores que afecten el

⁷⁷ HAILE Tesfaalem, PAPA VINASAM Sankara, ZINTEL Timothy “Validation of Corrosion Models Using Field Data Obtained from Oil and Gas Production Pipelines”. NACE International, 2013.

crecimiento y muerte de bacterias en tuberías, los factores ambientales considerados por el modelo de Sooknah⁷⁸ se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Variables que afectan el crecimiento microbiano

Variable	Comentarios	Rango de crecimiento óptimo	Rango de Inhibición
Temperatura	Puede variar desde valores muy bajos que inhiban el crecimiento hasta valores muy altos que resulten en muerte bacteriana	Valor óptimo de crecimiento entre 15 - 40°C. En algunos casos puede haber crecimiento considerable hasta 70°C	Crecimiento limitado 70 -120°C. Valores mayores, crecimiento nulo
Ph	Con excepción a valores extremos, las bacterias pueden sobrevivir en todo el rango de pH, sin embargo soluciones alcalinas afectan en gran manera su crecimiento	Valor óptimo entre 4 – 9 Valores entre 1 – 4 puede presentar crecimiento reducido	Inhibición significativa entre 9 – 14
Potencial de Óxido Reducción (ORP) del oxígeno	Se relaciona con la cantidad de oxígeno presente. Medida de estado oxidativo o reductivo del medio.	Se favorece el crecimiento bacteriano a valores positivos. Crecimiento óptimo a valores mayores a +150 mV	Valores menores a - 15 mV
Tasa de flujo	No afecta directamente el crecimiento. Influye en el proceso de formación de la biopelícula. A altas tasas de flujo disminuye considerablemente el volumen de biomasa y la adhesión de microorganismos.	Condiciones estáticas o zonas de interrupción constante del flujo. Generalmente velocidades mayores a 3 m/s (9.8 ft/s).	Valores entre 0 – 3 m/s (0 – 9.8 ft/s)

⁷⁸ SOOKNAH Reeta, PAPA VINASAM Sankara, REVIE Winston R “Validation of a Predictive Model for Microbiologically Influenced Corrosion”. NACE International, 2008.

Variables que afectan proceso de corrosión

Ciertas variables, principalmente la química del agua, sin influencia microbiológica, puede afectar el proceso de corrosión, disminuyendo o incluso aumentando su velocidad..

El modelo de Sooknah también tiene en cuenta el efecto de la limpieza y la aplicación de biocidas en la tubería (si es que se realizan) en la valoración del riesgo de la MIC. Estas variables se resumen en la Tabla 6.

El Índice de Saturación Langelier (LSI), es calculado de la siguiente manera:

$$LSI = pH - pH_s \quad (11)$$

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (12)$$

Donde,

$$A = \frac{\log_{10}(TDS) - 1}{10} \quad (13)$$

$$B = -13,12 \log_{10}(^{\circ}C + 273) + 34,55 \quad (14)$$

$$C = \log_{10}(Ca^{++} \text{ como } CaCO_3) - 0,4 \quad (15)$$

$$D = \log_{10}(\text{Alcalinidad como } CaCO_3) \quad (16)$$

Donde,

TDS = Cantidad Total de Sólidos Disueltos, ppm

$^{\circ}C$ = Temperatura de la muestra, $^{\circ}C$

Adicional a esto, variables como la limpieza a la tubería así como la aplicación de biocidas, pueden jugar un valor atenuante en la valoración de riesgo de la MIC, si es que se ha realizado alguno de estos procedimientos.

Tabla 6. Variables que afectan el proceso de corrosión

Variables	Comentarios	Condiciones Favorables	Condiciones Desfavorables
Cantidad Total de Sólidos Disueltos (TDS)	Se refiere al contenido mineralógico del agua. Evalúa la cantidad de aniones como Na^+ , K^+ , Mg^{++} y Ca^+ y de cationes como Cl^- , NO_3^- y $\text{SO}_4^{=}$. Este último de gran importancia para el crecimiento de las SRB que lo utilizan para su respiración celular generando sulfuros, principal mecanismo de la MIC.	Una condición favorable sería la presencia mínima de estos iones, concentraciones menores a 15000 ppm.	Cuando hay gran cantidad de estos iones, el riesgo de MIC aumenta considerablemente. Concentraciones mayores a 150000 ppm
Cantidad Total de Sólidos en Suspensión (TSS)	Pueden precipitarse y contribuir en la constitución de la biopelícula.	Es un factor no muy influyente cuando hay una alta velocidad de flujo.	En condiciones estáticas o a bajas velocidades, cualquier concentración puede influir negativamente
Índice de Saturación Langelier (LSI)	medida del carácter corrosivo o incrustante del agua. Es una medida dependiente de las variables anteriores, del pH y de la temperatura. Valores negativos de esta medida indican una tendencia corrosiva en el agua y valores positivos, tendencia a depositar escamas. ⁷⁹	Se buscan conseguir valores neutros de esta medida, preferiblemente dentro del rango -1 – 1	Tanto valores muy negativos o positivos de este índice, se consideran desfavorables, tanto por la tendencia corrosiva del agua como su tendencia a formar escamas según el caso.
Régimen Agrio-Dulce	Es la caracterización de un sistema como agrio o dulce. Se define que un sistema es dulce cuando la relación $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ es mayor a 500:1, mientras que un régimen agrio debe contener un porcentaje de H_2S mayor a 10 mol/kilomol (1%) en volumen ³ .	Régimen Dulce	Régimen Agrio

⁷⁹ SOOKNAH Reeta, PAPA VINASAM Sankara, REVIE Winston R. "Validation of a Predictive Model for Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, 2008.

Asignación del factor de riesgo (RF) y valoración de la susceptibilidad a la MIC

Como se explicó anteriormente, basada en la información de las variables previamente exhibidas, la probabilidad de ocurrencia la MIC puede ser estimada mediante la asignación de un factor de riesgo a cada variable descrita de manera previa, asignándosele un valor numérico de entre 0 y 10, traducidos como probabilidad o riesgo mínimo de MIC y probabilidad o riesgo máximo respectivamente. Esta asignación del RF se hace con ayuda de la Tabla 7 la cual fue desarrollada por Haile et al (2013), tomando como base el trabajo realizado anteriormente por Sooknah.

Para encontrar factores de riesgo en los intervalos descritos, se recomienda hacer una sencilla interpolación lineal entre los extremos para encontrar un valor más preciso del (RF).

El factor de riesgo de MIC se halla mediante la suma de cada factor de riesgo individual, dividido sobre el número total de variables evaluadas, de la siguiente manera:

$$(RF)_{MIC} = \frac{(RF)_1 + (RF)_2 + (RF)_3 + \dots + (RF)_n}{n} \quad (17)$$

Finalmente, la valoración del riesgo de MIC en el sistema donde se tomó la muestra, puede darse de manera cualitativa⁸⁰ con la Tabla 8.

⁸⁰ SOOKNAH Reeta, PAPA VINASAM Sankara, REVIE Winston R. "Validation of a Predictive Model for Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, 2008.

Tabla 7. Factores de riesgo correspondientes a cada variable

Variable	Rango de la variable	Unidad	Factor de riesgo (RF)
Temperatura	Menor a -10	°C	0
	-10 – 15		1
	15 – 45		7 – 10
	45 – 70		7 – 4
	70 – 120		4 – 1
	Mayor a 120		0
pH	Menor a 1	-	0
	1 – 4		5
	4 – 9		10
	9 – 13		1
	14		0
Potencial Óxido-Reducción (ORP)	Menor a -15	mV	1
	-15 – +150		1 – 10
	Mayor a +150		10
Tasa de flujo	Mayor a 3	m/s	1
	2 – 3		6 – 2
	0 – 2		10 – 6
	0		10
Total de Sólidos Disueltos (TDS)	Menor a 15000	Ppm	1
	15000 – 150000		1 – 10
	Mayor a 150000		10
Total de Sólidos Suspendidos (TSS)	Presentes	-	10 (si tasa de flujo está entre 0 – 3 m/s)
	Presentes		0 (si tasa de flujo >3 m/s)
	Ausentes		0
Índice de Saturación Langelier (LSI)	Menor a -6	-	10
	Entre -6 a -1		10 – 5
	-1 – 1		0 (condiciones neutra)
	1 – 8		1 – 8
Régimen Agrio – Dulce	Sistema agrio	-	10
	Sistema Dulce		2
Limpieza de la tubería	Sí	-	2,5 (Cada 15 días) 5 (>3 meses)
	No		10
Aplicación de biocidas o	Sí	-	2 (Sistemático) 5 (No sistemático)
	No		7

Fuente: Tomada y modificada de HAILE Tesfaalem, PAPA VINASAM Sankara, ZINTEL Timothy “Validation of Corrosion Models Using Field Data Obtained from Oil and Gas Production Pipelines”. NACE International, 2013.

Tabla 8. Valoración del riesgo o probabilidad de MIC

Riesgo muy Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Moderado	Riesgo Alto	Riesgo muy Alto
0 – 1,4	1,5 – 2,4	2,5 – 5,5	5,6 – 8,0	8,1 – 10,0

3.6. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

Los análisis microbiológicos son parte esencial en el diagnóstico y tratamiento de la corrosión microbiológica, pues son los procedimientos que permitirán identificar de manera directa si un sistema se encuentra infectado por bacterias asociadas a la MIC y más precisamente su cantidad y proporción en el sistema.

Para la metodología desarrollada en esta tesis fueron escogidas técnicas basadas en cultivos bacterianos debido a sus procedimientos relativamente sencillos y prácticos, y a que diversos autores como Janak (2012), Latifi (2007), Borenstein (1994) y Little (2007) mencionaron dichas técnicas como un método eficaz en la detección de organismos asociados a la MIC.

Técnica de cultivo (NACE Standard TM0194-2004)

Esta norma emplea técnicas de cultivo en la detección de bacterias reductoras de sulfato, bacterias depositadoras de metales y bacterias productoras de ácidos, las cuales son directamente responsables de la corrosión microbiológica. Fue seleccionada debido a su implementación en sistemas de hidrocarburos y a su uso en trabajos de ciertos autores como Janak (2012), Latifi (2007) en los que se obtuvieron resultados satisfactorios.

Estas técnicas se basan en el uso de un medio preparado especialmente para promover el crecimiento de ciertas bacterias en específico e inhibir el crecimiento de otras que puedan estar presentes en el sistema, por lo que permite cuantificar

de manera práctica y precisa, el microorganismo que se busca evaluar. Dicho esto, la clave en la detección de las bacterias objetivo, se basa en la selección de un medio de cultivo específico para cada una de ellas. Los métodos empleados por esta norma se exponen a continuación.

3.6.1. Bacterias Reductoras de Sulfato (BSR)

Las pruebas para estimar el número de BSR deben ser llevadas a cabo en duplicado, con el fin de aumentar la precisión al estimar las contribuciones de estas a los problemas de biocorrosión.

Consideraciones

Los medios de cultivo que se van a utilizar deben prepararse disolviendo los ingredientes en el solvente, ajustando el pH a 7,3 con una solución de NaOH, y todos los viales en los que sean almacenados a una temperatura recomendada de 40°F y deben ser marcados con la fecha en la que el medio fue preparado; posteriormente es necesario realizar una examinación periódica en busca de signos de deterioro.

Además los medios pueden ser realizados con agua del sistema, reemplazando al agua destilada, sin embargo algunas aguas pueden contener sulfuro haciendo inapropiado su uso para la preparación (pues puede provocar falsos positivos), en cuyo caso es necesario retirarlo previamente a través de evaporación.

No deben añadirse compuestos que contengan azufre, adicionales al sulfato puesto que estos permiten el crecimiento de bacterias diferentes a las bacterias sulfato-reductoras.

Equipos y Reactivos

Los siguientes son los materiales y agentes reactivos necesarios para llevar a cabo el procedimiento planteado:

- ✓ Viales para suero de 10 mL.
- ✓ Tapones plásticos y tapas metálicas.
- ✓ Pipetas plásticas estériles desechables de 3 mL, con agujas de 25 mm.
- ✓ Incubadora anaeróbica, si hay disponibilidad, de lo contrario se puede usar una incubadora convencional.
- ✓ Autoclave industrial.
- ✓ Parafina líquida o aceite mineral estéril.
- ✓ Medio de lactato de sodio para BSR, cuya composición se especifica en la Tabla 9.

Tabla 9. Ingredientes del Medio de Lactato de Sodio para BSR

Componente	Cantidad
Solución de Lactato de Sodio (60 a 70%)	4,0 mL
Extracto de levadura	1,0 g
Ácido ascórbico	0,1 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,2 g
K ₂ HPO ₄	0,01 g
Fe(SO ₄) ₂ (NH ₄) ₂ .6H ₂ O	0,2 g
NaCl	10,0 g
Agua destilada	1000 mL

- ✓ Medio Postgate B, cuya composición se especifica en la tabla 10

Tabla 10. Ingredientes del Medio Postgate B

Componente	Cantidad
KH_2PO_4	0,5 g
NH_4Cl	1,0 g
CaSO_4	1,0 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2,0 g
Lactato de Sodio	2,8 g
Extracto de levadura	1,0 g
Ácido tioglicólico	0,1 g
Ácido ascórbico	0,1 g
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,5 g
Agua destilada	1000 mL

Procedimiento

Los pasos a seguir para realizar la técnica de cultivo se muestran a continuación:

- 1) Llenar los viales con 9 mL de medio de lactato de sodio o de medio Postgate B.
- 2) Agregar 2 o 3 mL de parafina líquida estéril (o aceite mineral) en cada tubo para mantener condiciones anaeróbicas.
- 3) Sellar los viales con tapones de plástico.
- 4) Proteger los tapones de plástico con tapas metálicas desechables.
- 5) Esterilizar los tubos mediante autoclave durante 15 minutos a 250 °F.

- 6) Organizar los viales para facilitar la dilución en serie.
- 7) Inocular el primer vial de dilución con 1 mL de muestra. La pipeta plástica usada debe ser desechada.
- 8) Agitar vigorosamente el vial.
- 9) Utilizando otra pipeta plástica estéril, extraer 1 mL de este vial e inyectarlo en el segundo vial de la serie.
- 10) Manteniendo la pipeta estéril dentro del recipiente, invertir el vial y mezclar exhaustivamente por tres veces.
- 11) Extraer 1 mL de dicho fluido e inyectarlo en el tercer vial.
- 12) Repetir este procedimiento hasta la sexta dilución.
- 13) Incluir muestras de agua estéril con cada test como control negativo.
- 14) Una vez terminadas las diluciones, incubar los viales durante 28 días; la temperatura de incubación debe estar en el rango de $\pm 9^{\circ}\text{F}$ ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) con respecto a la temperatura de la muestra. Registrar dicha temperatura.
- 15) Viales cuyos medios se tornen de color oscuro serán etiquetados como positivos, no obstante, si el oscurecimiento ocurrió en menos de dos horas después de la inoculación no serán tomados en cuenta, debido a que el oscurecimiento es causado por la presencia de sulfuro en el agua.
- 16) Registrar el tiempo que le toma a cada vial oscurecerse.
- 17) Estimar el número de bacterias usando la Tabla 11.

Tabla 11. Número de bacterias reportadas de acuerdo al número de viales positivos

Número de Viales Positivos	Dilución Actual de la Muestra	Crecimiento de Bacterias Indicado por mL	Bacterias Reportadas por mL
1	1:10	1 a 9	10
2	1:100	10 a 99	100
3	1:1000	100 a 999	1000
4	1:10000	1000 a 9999	10000
5	1:100000	10000 a 99999	100000
6	1:1000000	100000 a 999999	1000000

3.6.2. Bacterias Depositadoras de Metales

Los siguientes métodos basados en la NACE Standard TM0194-2004 describen indicadores para detectar la presencia de bacterias depositadoras de metales en muestras sólidas o líquidas.

Consideraciones

El procedimiento a seguir así como los elementos necesarios son prácticamente los mismos que en el procedimiento anteriormente descrito para las BSR, por tanto se deben tener en cuenta la mayoría de las consideraciones. Dado que el método de las diluciones seriales estima poblaciones, basado en un análisis estadístico, es necesario resaltar que entre más replicados se hagan, mayor será la precisión de los resultados.

Equipos y Reactivos

Los equipos usados en esta técnica son exactamente los mismos usados en la metodología anterior, ya que corresponde a la misma práctica. En cuanto a los reactivos, solo cambia el medio de cultivo a utilizar.

- ✓ Caldo de Tioglicolato (ver Tabla 12)

Tabla 12. Ingredientes del Medio de cultivo de Tioglicolato

Componente	Cantidad
Extracto de levadura	5,0 g
Casitona	15,0 g
Cloruro de sodio	2,5 g
L-cistina	0,25 g
Ácido tioglicólico	0,3 g
Agar	0,75 g
Dextrosa	5,0 g
Agua destilada	1000 mL

pH ajustado a 7 con NaOH

- ✓ Caldo de nutrientes bacteriológicos estándar (Ver Tabla 13)

Tabla 13. Ingredientes del Medio de nutrientes bacteriológicos estándar

Componente	Cantidad
Extracto de carne	3,0 g
Peptona	5,0 g
Agua destilada	1000 mL

pH ajustado a 7 con NaOH

Procedimiento

Como se podrá observar el procedimiento es prácticamente el mismo que el usado para las bacterias sulfato reductoras.

- 1) Llenar los viales con 9 mL de medio de Tioglicolato o de nutrientes bacteriológicos estándar.
- 2) Sellar los viales con tapones de plástico.
- 3) Proteger los tapones de plástico con tapas metálicas desechables.
- 4) Esterilizar los tubos mediante autoclave durante 15 minutos a 250 °F.
- 5) Organizar los viales para facilitar la dilución en serie.
- 6) Inocular el primer vial de dilución con 1 mL de muestra. La pipeta plástica usada debe ser desechada.
- 7) Agitar vigorosamente el vial.
- 8) Utilizando otra pipeta plástica estéril, extraer 1 mL de este vial e inyectarlo en el segundo vial de la serie.
- 9) Manteniendo la pipeta estéril dentro del recipiente, invertir el vial y mezclar exhaustivamente por tres veces.
- 10) Extraer 1 mL de dicho fluido e inyectarlo en el tercer vial.
- 11) Repetir este procedimiento hasta la sexta dilución.

- 12) Una vez terminadas las diluciones, incubar los viales durante 14 días; la temperatura de incubación debe estar en el rango de $\pm 9^{\circ}\text{F}$ ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) con respecto a la temperatura de la muestra. Registrar dicha temperatura.
- 13) Viales cuyos medios se vuelvan turbios serán marcados como positivos.
- 14) Estimar el número de bacterias usando la Tabla 11.

3.6.3. Bacterias Productoras de Ácido

De la misma manera que con las BSR y las bacterias depositadoras de ácido, la técnica de cultivo explicada en la NACE Standard TM0194-2004 puede ser nuevamente empleada para la cuantificación de poblaciones de bacterias productoras de ácidos, si se le hacen los ajustes adecuados.

Consideraciones

Puesto que el procedimiento a seguir es prácticamente igual al que se utilizó con anterioridad para las BSR y para las bacterias depositadoras de metales, se deberán tener en cuenta la mayoría de las consideraciones formuladas para estos dos métodos. De nuevo hay que aclarar que cuanto mayor sea el número de replicados realizados, mejor serán las estimaciones arrojadas.

Equipos y Reactivos

De nuevo, los equipos usados en esta técnica son exactamente los mismos usados en la metodología anterior, ya que corresponde a la misma práctica. En cuanto a los reactivos, solo cambia el medio de cultivo a utilizar.

- ✓ Viales para suero de 10 mL.
- ✓ Tapones plásticos y tapas metálicas.
- ✓ Pipetas plásticas estériles desechables de 3 mL, con agujas de 25 mm.

- ✓ Incubadora anaeróbica, si hay disponibilidad, de lo contrario se puede usar una incubadora convencional.
- ✓ Autoclave industrial.
- ✓ Caldo Rojo de Fenol con Dextrosa (ver Tabla 14):

Tabla 14. Composición del Medio Rojo de Fenol con Dextrosa

Componente	Cantidad
Extracto de carne	1,0 g
Peptona	10,0 g
Rojo de fenol	0,018 g
Dextrosa	5,0 g
NaCl	5,0 g
Agua destilada	1000 mL

pH ajustado a 7 con NaOH

Procedimiento

Hay que recalcar que el procedimiento es prácticamente el mismo que el usado para las bacterias sulfato reductoras y las bacterias depositadores de metales, pero con ligeros cambios.

- 1) Llenar los viales con 9 mL de caldo rojo de fenol con dextrosa.
- 2) Sellar los viales con tapones de plástico.
- 3) Proteger los tapones de plástico con tapas metálicas desechables.
- 4) Esterilizar los tubos mediante autoclave durante 15 minutos a 250 °F.
- 5) Organizar los viales para facilitar la dilución en serie.
- 6) Inocular el primer vial de dilución con 1 mL de muestra. La pipeta plástica usada debe ser desechada.
- 7) Agitar vigorosamente el vial.
- 8) Utilizando otra pipeta plástica estéril, extraer 1 mL de este vial e inyectarlo en el segundo vial de la serie.

- 9) Manteniendo la pipeta estéril dentro del recipiente, invertir el vial y mezclar exhaustivamente por tres veces.
- 10) Extraer 1 mL de dicho fluido e inyectarlo en el tercer vial.
- 11) Repetir este procedimiento hasta la sexta dilución.
- 12) Una vez terminadas las diluciones, incubar los viales durante 14 días; la temperatura de incubación debe estar en el rango de $\pm 9^{\circ}\text{F}$ ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) con respecto a la temperatura de la muestra. Registrar dicha temperatura.
- 13) El cambio de color del medio de rojo a amarillo acompañado de un aumento en su turbidez es un indicador positivo de la presencia de bacterias productoras de ácidos.
- 14) Estimar el número de bacterias usando la Tabla 11.

3.7. TRATAMIENTO

De acuerdo a lo explicado en el capítulo anterior, una vez diagnosticada la presencia de MIC en el sistema el siguiente paso corresponde a la selección del tratamiento que será implementado con el fin de mitigar el proceso de biocorrosión.

Dicha selección es un proceso bastante complejo el cual requiere de un total conocimiento de las condiciones operacionales del sistema que permitan adaptar de acuerdo a las necesidades de la compañía estrategias efectivas de prevención y control de los procesos de corrosión microbiológica.

Desde el punto de vista financiero, los costos de los procesos de tratamiento y remediación son muy superiores a los costos generados por la aplicación de medidas preventivas, por esta razón, siempre se busca la optimización de la aplicación de dichas medidas a través del uso correcto de los equipos disponibles combinado con limpiezas regulares del sistema.

3.7.1. Limpieza Mecánica

A pesar de que el tratamiento químico del agua normalmente es la primera opción a utilizar, en determinados casos pueden no obtenerse los resultados esperados después de su aplicación, ya que las biopelículas regularmente impiden la penetración de los biocidas e inhibidores, disminuyendo considerablemente su desempeño. Por esta razón, es bastante recomendable llevar a cabo una limpieza mecánica previa y periódica que elimine de forma efectiva dichas películas microbianas y permita la difusión de las sustancias químicas en la superficie metálica.

La limpieza mecánica involucra el uso de cualquier método físico capaz de remover depósitos de la superficie del material, los cuales pueden ser incrustaciones o biopelículas.

Las incrustaciones son acumulaciones cristalinas de depósitos desarrolladas debido a la precipitación de minerales que se encuentran disueltos en el fluido, entre las más comunes están los carbonatos, los silicatos y los sulfatos; y su formación está directamente ligada a condiciones fisicoquímicas del medio tales como pH, temperatura, calidad, condiciones hidrodinámicas y la concentración de ciertas especies en solución.

Las biopelículas como se especificó anteriormente se generan debido a la acumulación y posterior sedimentación de material orgánico proveniente de actividades microbianas, sobre la superficie metálica, no obstante, algunos depósitos pueden derivar de otras fuentes como aceites minerales, ceras, inhibidores, e incluso compuestos utilizados para limpieza y otros tipos de contaminantes.

Borenstein (1994) describió varios métodos usados para realizar la limpieza mecánica los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 15, sin embargo, la aplicación de la mayoría de estos en sistemas de petróleo y gas se ve muy

limitada, por esta razón uno de los métodos que más se utiliza en la actualidad para la limpieza en la industria de los hidrocarburos son los pigs de limpieza tal y como se demuestra en trabajos de autores como Latifi (2007) y Powell (1996).

Tabla 15. Métodos de limpieza mecánica para diferentes superficies

Método	Características
Lavados	Método más simple; eficacia limitada; biopelículas delgadas no se ven afectadas; muy efectivo si la estabilidad de la biopelícula es previamente disminuida.
Retrolavados	Similar a los lavados
Bolas de esponja abrasivas	Eficacia razonable; pueden dañar el material.
Bolas de esponja no abrasivas	Menos efectivas que las abrasivas; no recomendadas para biopelículas con efectos lubricantes.
Limpieza con chorro abrasivo	Muy efectivos; difícil concentrar el efecto abrasivo sobre la biopelícula sin afectar el material.
Cepillado	Muy efectivo pero limitado a superficies accesibles; pueden cambiar la población en las biopelículas a especies capaces de formar EPS muy estables.
Agua caliente, vapor	Especialmente adecuado para sistemas de agua purificada; eficacia contra biopelículas de gran espesor no evaluada; uso intensivo de energía.

Los pigs de limpieza son dispositivos desarrollados para retirar depósitos sólidos o semisólidos de las tuberías metálicas y son utilizados principalmente en líneas largas que no presentan cambios en la dirección o en el tamaño de las secciones. Normalmente, los sistemas de pigging incluyen pigs, un lanzador, un receptor, y unas bombas y compresores, que se encargarán de impulsar los pigs a través de las tuberías. Estos elementos son muy efectivos en superficies lisas, sin embargo, su efectividad disminuye al ser utilizados en superficies con cavernas o grietas.

Otra limitación de esta técnica es el alto costo de las operaciones de búsqueda y recuperación de los pigs cuando estos se atascan en las tuberías.

Para finalizar, se debe tener en cuenta que en ningún momento las limpiezas mecánicas reemplazarán los tratamientos químicos, por el contrario, ambos métodos deben ser usados en conjunto con el fin de garantizar la máxima efectividad del tratamiento.

3.7.2. Aplicación de Sustancias Químicas

Como se ha venido discutiendo durante este trabajo, las bacterias y otros microorganismos presentes en los fluidos transportados por el sistema pueden ser responsables de graves problemas de corrosión, lo que hace muy importante la aplicación de sustancias químicas que inhiban la MIC, tan pronto haya sido confirmada, ya sea a través de la eliminación de los organismos responsables (biocidas) o a través de la modificación de los procesos electroquímicos que generan corrosión (inhibidores).

Biocidas

En el capítulo anterior los biocidas fueron definidos como sustancias químicas que resultan venenosas para diversos tipos de especies microbianas, además se explicaron de manera detallada los compuestos comúnmente implementados en la industria así como las combinaciones de mayor uso actualmente, y se enfatizó en el hecho de que cada biocida podría responder de forma adecuada a ciertos microorganismos y a otros no; por esta razón es necesario realizar pruebas que permitan seleccionar de una manera precisa la sustancia o la combinación de sustancias de mejor desempeño.

Para este caso la práctica consignada en la norma ASTM E645-13⁸¹ fue seleccionada y se explicará a continuación:

Consideraciones

Este tipo de prueba es más confiable a medida que las condiciones en las que se realiza se acerquen a las condiciones normales de operación del sistema, por lo tanto, el investigador debe modificar el procedimiento para adaptarse al sistema a evaluar.

También hay que tomar en cuenta que este método es solo una guía para la aplicación en campo de los biocidas. Por lo tanto, la efectividad de las sustancias debe ser confirmada una vez han sido añadidas al sistema, puesto que, generalmente es necesario realizar ajustes a las concentraciones.

Equipos y Reactivos

Estos son los materiales que deben ser usados para realizar la técnica:

- ✓ Viales para suero de 10 mL.
- ✓ Tapones plásticos y tapas metálicas.
- ✓ Frascos volumétricos estériles de 100 mL.
- ✓ Pipetas plásticas estériles desechables de 3 mL, con agujas de 25 mm.
- ✓ Incubadora anaeróbica, si hay disponibilidad, de lo contrario se puede usar una incubadora convencional.
- ✓ Balanza analítica calibrada, con sensibilidad de 0,1 mg.
- ✓ Autoclave industrial.
- ✓ Centrífuga.
- ✓ Cualquiera de los medios de cultivo citados anteriormente, dependiendo del tipo de bacteria a tratar.

⁸¹ ASTM Designation E645-13. "Evaluation of Microbicides Used in Cooling Water Systems". (West Conshohocken: ASTM, 2013).

Procedimiento

El procedimiento es relativamente sencillo puesto que está basado en las técnicas de cultivo que fueron explicadas con anterioridad.

- 1) Ubicar una muestra del sistema en una centrífuga, y mezclar continuamente.
- 2) Transferir 100 mL de muestra a un frasco estéril.
- 3) Preparar un vial de muestra con su respectivo duplicado por cada concentración de biocida a probar; además, preparar un vial de control al cual no se le agregará biocida. Hay que aclarar que 10 mL es el volumen estándar, sin embargo, otros volúmenes pueden ser usados en esta prueba.
- 4) Una vez las muestras han sido transferidas a los viales, determinar la población bacteriana mediante cualquiera de los análisis microbiológicos descritos anteriormente, dependiendo del tipo de microorganismo que se vaya a evaluar.
- 5) Las concentraciones apropiadas de prueba para un biocida particular deben ser determinadas por el que realiza la prueba. Usualmente, estas concentraciones dependen de los rangos de aplicación este biocida. El volumen de solución del biocida no debe exceder el 1% del volumen de agua.
- 6) Preparar una solución stock del biocida de acuerdo a la concentración determinada anteriormente, pesando el biocida en una balanza analítica y transfiriéndolo a un frasco volumétrico, usando agua como solvente. Estas soluciones deben prepararse no más de 3 horas antes de realizar la prueba.
- 7) Añadir la solución stock de biocida a los viales a intervalos de tiempo de $2 \pm 0,5$ minutos. Posteriormente estos deben ser ordenados de la misma manera en las que el biocida fue añadido.
- 8) Los tiempos de exposición son determinados por el que realiza la prueba.

- 9) Mezclar las muestras a 100 o 150 revoluciones/minuto.
- 10) Incubar los viales durante el tiempo recomendado para cada tipo de medio.
- 11) Determinar el número de bacterias utilizando la Tabla 12.
- 12) Calcular la reducción en el número de microorganismos de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\log_{reduccion} = \log(A) - \log(B)$$

Dónde:

A = conteo inicial de microorganismos en la muestra de control, y

B = número de microorganismos detectados a una concentración de biocida dada después de un tiempo de contacto determinado. Finalmente:

1-log reducción = 90% muerte microbiana.

2-log reducción = 99% muerte microbiana.

3-log reducción = 99.9% muerte microbiana.

4-log reducción = 99.99% muerte microbiana.

- 13) El que realiza la prueba determinará la concentración mínima aceptable para definir la efectividad del proceso. Sin embargo, en la mayoría de los casos, se considera que un 90% de reducción microbiana es suficientemente efectivo.
- 14) Si no se logra una reducción aceptable, se debe escoger otro biocida o crear los ajustes apropiados en las concentraciones.

Inhibidores de Corrosión

El procedimiento que se explicará en breve, busca evaluar la capacidad de prevenir la formación de biopelículas microbianas así como la capacidad biocida de algunos inhibidores de corrosión. Este procedimiento fue seleccionado de "Selection of Corrosión Inhibitors to Control Microbiologically Influenced

Corrosión⁸², realizado por Prasad en 1998, debido a que presenta una estructura metodológica completa utilizable para evaluaciones de inhibidores en distintos sistemas industriales.

Consideraciones

Dado que esta metodología está basada en los procedimientos descritos a lo largo de este capítulo, las consideraciones operacionales son similares. Por ejemplo, la exactitud de esta prueba variará de acuerdo a la capacidad que tenga el investigador de replicar las condiciones naturales del sistema durante su realización, y la precisión de los conteos mejorará si se realiza una mayor cantidad de replicados.

Equipo y Reactivos

A continuación, la lista de los materiales que se van a utilizar en la prueba:

- ✓ Viales para suero de 10 mL.
- ✓ Tapones plásticos y tapas metálicas.
- ✓ Frascos volumétricos estériles de 100 mL.
- ✓ Pipetas plásticas estériles desechables de 3 mL, con agujas de 25 mm.
- ✓ Incubadora anaeróbica, si hay disponibilidad, de lo contrario se puede usar una incubadora convencional.
- ✓ Autoclave industrial.
- ✓ Xileno, acetona e isopropileno.
- ✓ Alginato.
- ✓ Cupones de acero de 1½" x ½".
- ✓ Toallas de papel absorbentes.
- ✓ Cualquiera de los medios de cultivo citados anteriormente, dependiendo del tipo de bacteria a tratar.

⁸² PRASAD, Rupi. "Selection of Corrosion Inhibitors to Control Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, Houston, 1998.

Procedimientos

Los procedimientos que se enuncian a continuación, buscan evaluar la efectividad de inhibición de los inhibidores de corrosión en el proceso de MIC, así como la capacidad biocida que algunos pueden presentar (Ver Capítulo 2, inhibidores de corrosión). Los procedimientos individuales se enuncian a continuación.

Prueba de Cupones

En esta prueba se aplican ciertos inhibidores de corrosión sobre la superficie de cupones de corrosión y luego se someten a condiciones corrosivas posteriormente, comparando los resultados obtenidos con los cupones de control a los cuales no se les aplicaron dichos inhibidores.

- 1) Limpiar los cupones usando xileno, acetona o isopropileno y secar con nitrógeno.
- 2) Sumergir los cupones en solución inhibidora por tres minutos.
- 3) Lavar los cupones tres veces con agua esterilizada.
- 4) Secar el agua cuidadosamente con toallas de papel.
- 5) Sumergir los cupones totalmente en el medio de cultivo bacteriano.
- 6) Incubar las botellas con los cupones a 37°C.
- 7) Observar las botellas diariamente, durante uno o dos meses, registrando cualquier cambio de color que ocurra en el medio o en los cupones.

Prueba de Tiempo de Muerte

Esta técnica es prácticamente igual a la realizada para determinar la efectividad de los biocidas:

- 1) Transferir 100 mL de una muestra de fluido a un frasco estéril.

- 2) Preparar un vial de muestra con su respectivo duplicado por cada concentración a probar (400 y 500 ppm); además, preparar un vial de control al cual no se le agregará inhibidor.
- 3) Una vez las muestras han sido transferidas a los viales, determinar la población bacteriana mediante diluciones seriales, usando el medio respectivo para el tipo de bacteria a evaluar.
- 4) Preparar dos soluciones inhibidoras, una de 400 ppm y otra de 500 ppm, usando agua como solvente.
- 5) Añadir las soluciones inhibidoras a los viales a intervalos de tiempo de $2 \pm 0,5$ minutos, permitiendo de 4 a 5 horas de contacto.
- 6) Incubar los viales durante el tiempo recomendado para cada tipo de medio.
- 7) Determinar el número de bacterias utilizando la tabla 4.
- 8) Calcular la reducción en el número de microorganismos de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\log_{reduccion} = \log(A) - \log(B)$$

Dónde:

A = conteo inicial de microorganismos en la muestra de control, y

B = número de microorganismos detectados a una concentración de inhibidor dada después de un tiempo de contacto determinado.

1-log reducción = 90% muerte microbiana.

2-log reducción = 99% muerte microbiana.

3-log reducción = 99.9% muerte microbiana.

4-log reducción = 99.99% muerte microbiana.

3.8. MONITOREO

Una vez realizado el tratamiento químico de corrosión microbiológica, es necesario realizar un proceso monitoreo continuo del sistema mediante cualquiera de las técnicas indicadas previamente durante el Capítulo 2, que permita evaluar en

tiempo real los tratamientos químicos aplicados, puesto que muchas veces las evaluaciones realizadas en laboratorio no arrojan resultados del comportamiento real de los compuestos químicos en el sistema. Es un paso indispensable que permite evaluar la efectividad del tratamiento y tomar decisiones posteriores.

Finalmente, hay que tener en cuenta que el esquema planteado en la figura 34 y explicado durante toda esta sección, no supone una estructura lineal, debido a que el fenómeno de MIC es un problema complejo de constante cambio y adaptación. Por este motivo es imprescindible la aplicación de evaluaciones periódicas que permitan apreciar su variación a través del tiempo. Por último, el éxito del tratamiento, más allá de la aplicación del esquema planteado, se logra mediante la correcta coordinación de los procesos anteriormente planteados con el fin de evitar al máximo la contaminación y reaparición de este fenómeno corrosivo.

4. APLICACIÓN DEL MODELO DE SOOKNAH EN UN CAMPO COLOMBIANO

En esta sección, se consigna el proceso de aplicación del modelo descrito en el capítulo anterior en la valoración preliminar de riesgo de MIC, evaluado en 10 pozos productores de un campo del piedemonte llanero colombiano. Adicionalmente y de forma paralela, en un proyecto realizado en el Parque Tecnológico de Guatiguará, se llevaron a cabo pruebas microbiológicas elaboradas con el fin de evaluar de manera directa el riesgo de corrosión presente en cada pozo seleccionado. Al final de este capítulo se realiza una comparación entre los resultados obtenidos del modelo, con los obtenidos de manera independiente en las pruebas microbiológicas, con el fin de evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

4.1. DATOS DE LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Se tomaron muestras de 100 mL en 10 pozos distintos con el fin de ser analizadas para obtener las variables necesarias en el desarrollo del modelo. Hay que tener en cuenta que en algunos puntos de muestreo no fue posible recolectar el volumen requerido debido a la presencia de emulsiones que no pudieron romperse mediante la aplicación de temperatura⁸³. Los pozos muestreados se presentan en la Tabla 16. Posterior a esto se procedió a realizar un análisis del agua muestreada de cada pozo, resultados que se consignan en el anexo B.

4.2. ASIGNACIÓN DE FACTORES DE RIESGO (RF) Y DESARROLLO

Siguiendo con el procedimiento, en esta parte a las variables disponibles de cada muestra se les debe asignar un factor de riesgo correspondiente de acuerdo a su contribución individual al desarrollo de la corrosión microbiológica tal como se

⁸³ ECOPETROL S.A.

debatío en el capítulo 4. Esta caracterización del (RF) debe hacerse con la tabla 9 presentada en el capítulo anterior.


Tabla 16. Pozos Muestreados (Ecopetrol)

Identificación
Pozo 1
Pozo 2
Pozo 3
Pozo 4
Pozo 5
Pozo 6
Pozo 7
Pozo 8
Pozo 9
Pozo 10

Nótese que variables como el potencial de óxido-reducción (E_h), la tasa de flujo e informes sobre la limpieza o la aplicación de biocidas no fueron suministradas por el equipo que realizó el muestreo. En estos casos el modelo permite ignorar dichas variables faltantes debido a su versatilidad, sin embargo hay que tener en cuenta que esta falta de información puede afectar en el resultado final, debido a que entre más información se provea al modelo, más confiable será la respuesta del mismo. No se recomienda asumir valores arbitrarios de estas variables faltantes pues en la mayoría de los casos esta práctica sólo contribuye un mayor alejamiento del resultado obtenido del valor real. Para el desarrollo final del modelo de Sooknah, es recomendable realizar una matriz de riesgos que facilite el desarrollo final y el cálculo de los riesgos o probabilidades finales. Para este último procedimiento, se desarrolló una herramienta Excel (Figura 38), que pudiera calcular la valoración final de riesgo de la MIC con sólo ingresar los valores requeridos para cada muestra. Para esto se definieron valores de entrada (Figura 39) que estuvieran enlazados con las celdas de solución a las cuales se les asignó una serie de condicionales que evaluara la posición de la variable a analizar y arrojará un resultado de RF correspondiente.

Figura 38. Herramienta Excel para la solución del modelo de Sooknah.

MODELO DE VALORACIÓN DE RIESGO DE LA MIC
Resto Sooknah. Sankara Papayinasam, and R. Winston Reville
 NACE International, 2008



Información de Muestreo y Análisis Químico del Agua del Campo

Tabla de pozos muestreados	
Número	Identificación
1	Pozo1
2	Pozo2
3	Pozo3
4	Pozo4
5	Pozo5
6	Pozo6
7	Pozo7
8	Pozo8

A continuación se presenta una herramienta didáctica que permite calcular la probabilidad de ocurrencia de MIC de acuerdo a condiciones químicas y parámetros operacionales del sistema a evaluar. La herramienta está resuelta para 10 muestras de pozos de un campo petrolero del departamento del Casanare. Los valores requeridos por la matriz pueden ser editados con el fin de obtener resultados a diversas condiciones.

Convenciones básicas de la herramienta

La información mínima requerida por el sistema está resuelta en el color "Blanco". Los otros datos no son necesarios para la solución, se encuentran allí por cuestiones de orden.

Se recomienda proporcional a la herramienta la totalidad de datos solicitados, sin embargo, las variables de las que no se tenga información deben llenarse en la celda con un "-". Esto puede afectar.

Códigos de color:

RIESGO MUY BAJO	RIESGO BAJO	RIESGO MODERADO	RIESGO ALTO	RIESGO MUY ALTO
-----------------	-------------	-----------------	-------------	-----------------

MATRIZ DE VALORACIÓN DE RIESGOS						
Pozo	1	2	3	4	5	6
pH	10	10	10	10	10	10
Temperatura (°C)	9,9	8,3	9,2	8,6	5,3	9,2
Velocidad de Flujo	-	-	-	-	-	-
Régimen agrio/dulce	2	2	2	2	2	2
Total de sólidos en suspensión (TSS)	10	10	10	10	10	10
Total de sólidos disueltos (TDS)	1	1	1	1	1	1
Potencial Redox	-	-	-	-	-	-
LSI	1,4	1,2	0	0	1,6	0
Aplicación de Biocidas (sí o no)	-	-	-	-	-	-
Limpieza o Pigging (sí o no)	-	-	-	-	-	-
Índice numérico de						

Figura 39. Datos de entrada de la herramienta.

Datos de Entrada:											
Análisis Calidad de Agua - Pruebas IN SITU											
POZO	Horas	Coordenadas USR	pH	Temperatura Muestra (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Oxígeno disuelto (O ₂) mg/L	Potencial Óxido-Reducción (mV)	H ₂ S (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	Tasa de flujo m ³ /s	Otros Parámetros (Zona de recolección) Aplicación de Biocidas Limpieza o piggings
1	09:40 a.m.	1163721 1071739	7,39	43,5	35,8	2,6	-	0,5	1,25	-	-
2	01:40 p.m.	1165837 1073339	7,4	28,3	24,3	2,46	-	0	37,5	-	-
3	01:55 p.m.	1165837 1073339	7,19	36,5	24,3	4,2	-	0	105	-	-
4	10:20 a.m.	1154436 1056858	6,46	31,4	30,1	2,22	-	0	60	-	-
5	03:00 p.m.	1156825 1061803	7,27	59,1	36,1	2,44	-	0,3	100	-	-
6	09:50am	1158204 1061564	7,07	36,6	34,9	1,98	-	0,5	65	-	-
7	10:00 a.m.	1159496 1064965	6,81	37	36,4	2,03	-	0	70	-	-
8	11:56 a.m.	1164274 1071350	5,14	31,8	31,2	4,61	-	0	100	-	-
9	03:00 p.m.	1157270 1063923	7,7	37,6	30,9	3,97	-	0,3	60	-	-
10	10:50 a.m.	1162157 1071409	7,21	36,2	29,9	2,76	-	0,5	50	-	-

Análisis Calidad de Agua de Producción										
PARÁMETRO	POZO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Turbiedad (NTU)	63	24	165	72	27	22	720	38	146	84
Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /L)	750	750	500	500	750	750	500	250	500	500
DBO ₅ (mg/L O ₂)	120	141	510	106	112	48	319	170	465	159
Sulfatos (mg/L SO ₄)	29,25	20,14	3,01	22,22	31,82	13,8	11,25	5,86	10,93	40,24

Para encontrar estos factores de riesgo en los intervalos descritos en la tabla 3, la herramienta realiza unas sencillas interpolaciones para aumentar la precisión del (RF) y para disminuir al máximo la selección arbitraria que se proponía inicialmente en el documento de Sooknah et al⁸⁴. A continuación se presenta la solución dada por la herramienta y la valoración de riesgo de MIC en cada uno de los pozos muestreados (Tabla 17). La matriz en tamaño completo puede observarse en el anexo C.

Tabla 17. Valoración del riesgo de MIC en los 10 pozos productores del campo

Pozo	Índice numérico	Índice de susceptibilidad al MIC
1	5,7	Riesgo Alto
2	5,4	Riesgo Moderado
3	5,4	Riesgo Moderado
4	5,3	Riesgo Moderado
5	5	Riesgo Moderado
6	5,4	Riesgo Moderado
7	5,4	Riesgo Moderado
8	6	Riesgo Alto
9	5,5	Riesgo Moderado
10	5,4	Riesgo Moderado

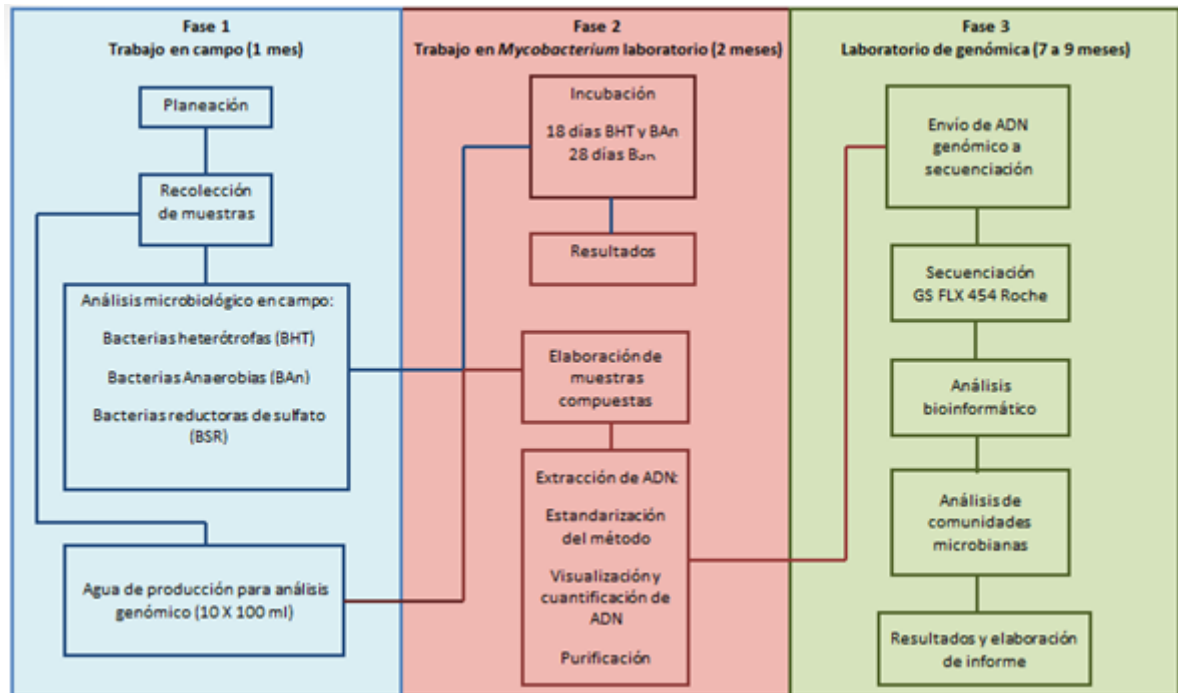
4.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Se llevó a cabo, de manera paralela, un proyecto en el Parque Tecnológico de Guatiguará en donde se realizaron pruebas microbiológicas a las muestras recogidas de los 10 pozos ya descritos.

⁸⁴ SOOKNAH Reeta, PAPA VINASAM Sankara, REVIE Winston R. "Validation of a Predictive Model for Microbiologically Influenced Corrosion". NACE International, 2008.

De esta manera, se evaluó de forma directa el riesgo de corrosión microbiana con respecto al crecimiento bacteriano observado.

Figura 40. Esquema del desarrollo del análisis metagenómico.



Fuente: Ecopetrol S.A

Durante el proceso de desarrollo se pudo realizar una valoración del riesgo de corrosión microbiana de manera individual para cada pozo muestreado. El resultado puede resumirse en la Tabla 18.

Tabla 18. Características de las muestras complejas

Código de Identificación	Nivel de riesgo de corrosión	Pozos Incluidos
S-A	Alto	1, 8, 10
S-B	Medio/Bajo	2, 3, 4, 5, 6, 7, 9

Fuente: Ecopetrol S.A

Puede corroborarse mediante esta información que el modelo de Sooknah predijo correctamente un **Alto Riesgo** de MIC para los pozos 1 y 8 así como **Riesgo Moderado** para la cantidad de pozos restantes tal como aparece consignado en la tabla 18. No obstante, el pozo 10 arrojó una valoración de **Riesgo Moderado** a diferencia de los datos experimentales.

Esto puede deberse a diversos factores como la falta de la totalidad de datos para desarrollar el modelo, por lo que se recomienda realizar el total de mediciones necesarias y de manera cuidadosa a la hora de desarrollar esta valoración preliminar. Sin embargo, en términos generales resulta una herramienta útil para predecir riesgos de MIC cuando se dispone de información bastante limitada o nula de las condiciones microbiológicas del sistema.

Este modelo, como ya se indicó varias veces, está basado en los diversos factores que afectan positiva o negativamente el crecimiento bacteriano, por lo que un análisis sencillo de los factores ambientales del sistema, antes de realizar otras pruebas de diagnóstico directo, resulta acertado para estimar una valoración preliminar de riesgo de MIC.

5. CONCLUSIONES

- Debido a los equipos necesarios y a los conocimientos microbiológicos requeridos para realizar las pruebas planteadas en la metodología, dichas pruebas no pueden ser realizadas actualmente en el laboratorio de petrofísica y daño a la formación del parque tecnológico de Guatiguará.
- El éxito de un programa de mitigación de la MIC va más allá de la aplicación del esquema planteado y de la coordinación e implementación periódica de los procesos anteriormente mencionados, viendo a este esquema como un proceso cíclico de constante valoración, detección y tratamiento.
- El modelo Sooknah predijo de manera satisfactoria el riesgo corrosión microbiológica en 9 de los 10 pozos evaluados, demostrando de esta manera ser una herramienta útil en la valoración preliminar de la MIC en condiciones de campo sin contar con compleja información microbiológica del sistema. Su estructura sencilla y gran versatilidad lo convierte en una herramienta ideal de aplicación en campo sin reemplazar los otros métodos de diagnóstico directo.
- Si al momento de trabajar con el modelo de Sooknah no se cuenta con la totalidad de los datos requeridos, se recomienda omitir los valores, debido a que este modelo evalúa cada variable de manera independiente. Tomar valores arbitrarios sólo generará una mayor imprecisión de los resultados obtenidos.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar una investigación de manera multidisciplinaria de la MIC que involucre la participación de otras extensiones de la universidad con mayor experiencia en trabajos microbiológicos, debido a la cantidad de conocimientos específicos que se requieren para su entendimiento y manejo.
- Proponer una línea de investigación en aquellas escuelas especializadas en estudios microbiológicos dedicada a investigar los avances relacionados a corrosión microbiológica aplicados a campos petrolíferos.
- Realizar un estudio más a fondo sobre las características, aplicaciones y limitaciones de los métodos de predicción, tratamiento y monitoreo que se encuentran en la actualidad en fase experimental.
- Aplicar la metodología planteada en un sistema donde hayan sospechas de posible corrosión microbiológica.
- Realizar revisiones de distintos modelos más completos que puedan predecir de manera cuantitativa la tasa de corrosión debido a la MIC.
- Debido a que las pruebas de tratamientos químicos suponen un proceso de prueba y error, se recomienda realizarlas en presencia de personal que tenga experiencia en la realización de este tipo de procedimientos.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE: API-RP 38. Recommended Practice for Biological Analysis of Subsurface Injection Waters. New York: API, 1965.

ASTM Designation D4412-84. "Standard Test Methods for Sulfate-Reducing Bacteria in Water and Water-Formed Deposits". (West Conshohocken: ASTM, 2009).

ASTM Designation D7464-08. "Standard Practice for Manual Sampling of Liquid Fuels, Associated Materials and Fuel System Components for Microbiological Testing". (West Conshohocken: ASTM, 2008).

ASTM Designation D932-85. "Standard Test Method for Iron Bacteria in Water and Water-Formed Deposits". (West Conshohocken: ASTM, 2009).

ASTM Designation E645-13. "Evaluation of Microbicides Used in Cooling Water Systems". (West Conshohocken: ASTM, 2013).

AZEREDO, J. OLIVEIRA, R. "The Role of Exopolymers in the Attachment of *Sphingomonas paucimobilis*". Centro de Engenharia Biológica-IBQF, Universidade do Minho, 4710-057. Braga-Portugal, 2000.

BEECH, Iwona y GAYLARD, Christine: Recent Advances in the Study of Biocorrosion – An Overview. Porto Alegre: Revista de Microbiologia, 1999.

BARTLETT, Kimberly. KRAMER, Jeffrey "Comparative Performance of Industrial Water Treatment Biocides". NACE International, USA, 2011.

BARTON, Larry y HAMILTON, Allan: Sulphate-Reducing Bacteria. Environmental and Engineered Systems. New York: Cambridge University Press, 2007.

BLACKBURN, Freeman. "Non-Bioassay Techniques for Monitoring MIC". NACE International, Houston, 2004.

BORENSTEIN Susan W, “Microbiologically Influenced Corrosion Handbook”. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge CB1 6AH, England, 1994.

CORD-RUWISCH, Ralf; KLEINITZ, Wolfram y WIDDEL, Friedrich: Sulfate-Reducing Bacteria and their Activities in Oil Production. Journal of Petroleum Technology, 1987.

COSTERTON, John William: Introduction to Biofilm. International Journal of Antimicrobial Agents, 1999.

DAVIS, Joseph: Corrosion Understanding the Basis. Ohio: ASM International, 2000.

DIETSCHE, Frank; HEIDENFELDER, Thomas; WITTELER, Helmut. “Organic Corrosion Inhibitors for Industrial Water Treatment. NACE International, Houston, 2007.

GANZER, G.A. MCILWAINE, J.A. DIEMER, M. Freid. RUSSO, M. “Applications of Glutaraldehyde in the Control of MIC” NACE International, Houston, Texas – USA, 2001.

GAYLARD, Christine; BENTO, Fatima; KELLEY, Joan: Microbial Contamination of Stored Hydrocarbon Fuels and its Control. Porto Alegre: Revista de Microbiologia, 1999.

GERCHAKOV, SM. ROTH, FJ. SALLMAN, B. UDEY, LR, MARSZALEK, DS “Observations on microfouling applicable to OTEC systems”. Gray H. Seattle, 1977.

HAILE Tesfaalem, PAPAVINASAM Sankara, ZINTEL Timothy “Validation of Corrosion Models Using Field Data Obtained from Oil and Gas Production Pipelines”. NACE International, 2013.

HARDY, John y HAMILTON, Allan: The Oxygen Tolerance of Sulfate Reducing Bacteria isolated from the North Sea Waters. New York: Current Microbiology, 1981.

HEITZ, E. FLEMMING, H. C. SAND, W “Microbially Influenced Corrosion of Materials” Springer, Berlín, 1996.

KEDDAM Michel. MONFORT, Nicolas. TRIBOLLET, Bernard “Detection and Mapping of SRB Influenced Corrosion of C-Steel”. NACE International, Université P. et M. Curie, París – Francia, 2002.

LARSEN, Jan. KJELLERUP, Birthe. NIELSEN, Jeppe. “Identification of Bacteria Causing Souring and Biocorrosion in the Halfdan Field by Application of New Molecular Techniques”. NACE International, Houston, 2005

LEE, Whonchee y DEBEER, Dirk: Oxygen and pH Microprofiles above Corroding Mild Steel covered with a Biofilm. Singapore: Biofouling, 1995.

LICINA, George. “Monitoring Methods for MIC”. NACE International, Houston, 2007.

LITTLE, Brenda y LEE, Jason: Microbiologically Influenced Corrosion. New Jersey: Wiley & Sons Inc., 2007.

LITTLE, Brenda y WAGNER, Patricia: Microbiologically Influenced Corrosion. Houston: NACE International, 1997.

LITTLE, Brenda; WAGNER, Patricia; DUQUETTE, David: Microbiologically Induced Increase in Corrosion Current Density of Stainless Steel under Cathodic Protection. Mississippi: Naval Ocean Research and Development Activity Stennis Space Center Ms, 1988.

LITTLE, Brenda; WAGNER, Patricia; HART, Kevin; RAY, Richard; LAVOIE, Dennis; NEALSON, Kenneth; AGUILAR, Carmen: The Role of Metal-Reducing

Bacteria in Microbiologically Influenced Corrosion. Louisiana: NACE International, 1997.

MANSFELD, Florian y XIAO, Hong; “Electrochemical Techniques for Detection of Localized Corrosion Phenomena”. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

MAXWELL, S. MACKENZIE, G. KUIJVENHOVEN, C. LOMANS, B. GRANLI, T “Laboratory Studies of Microbicide and Nitrate Strategies for MIC and Reservoir Souring Mitigation”, NACE International, Escocia, 2008.

MUTHUKUMAR, M.; MARUTHAMUTHU, S.; MOHANAN, S.; PALANISWAMY, N. “Oil Soluble Corrosion Inhibitor on Microbiologically Influenced Corrosion in Diesel Transporting Pipeline”. Portugaliae Electrochimica Acta 25, 2007.

NACE Standard TM0194-2004. “Field Monitoring of Bacterial Growth in Oil and Gas Systems”. Houston: NACE, 2004.

POPE, Daniel “Development of Methods to Detect Sulfate-Reducing Bacteria-Agents of Microbiologically Influenced Corrosion” NACE Internacional, New York, 1990.

POPE, Daniel y STOECKER, John: Process industries corrosion – the theory and practice. NACE publication, 1986.

POSTGATE, John: The Sulphate-Reducing Bacteria. Great Britain: Cambridge University Press, 1979.

POWELL, Daniel; BOHON, Mark; CHESNUT, Gary: “Solid Gel Pigs for Cleaning Production Pipelines”. Texas: NACE International, 1996.

PRASAD, Rupi. “Selection of Corrosion Inhibitors to Control Microbiologically Influenced Corrosion”. NACE International, Houston, 1998.

ROBERGE, Pierre: Handbook of Corrosion Engineering. Martinsburg: McGraw-Hill, 2000.

RODEN, Erick y LOVELY, Derek: Dissimilatory Fe(III) Reduction by the Marine Microorganism *Desulfuromonas Acetoxidans*. Applied and Environmental Microbiology, 1993.

SASTRI, Vedula. "Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice". Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2011.

SCHMITT, G. "Sophisticated Electrochemical Methods for MIC Investigation and Monitoring". Materials and Corrosion 48. 1997.

SMITH, J.P. "Bacteria Mitigation and Monitoring in IAPCO'S Waterfloods and Production Facilities", Proceedings Indonesian Petroleum Association, 1984.

SOOKNAH, Reeta; PAPA VINASAM, Sankara; REVIE, Winston. "Monitoring Microbiologically Influenced Corrosion: A Review of Techniques". Ottawa, NACE International, 2007.

SORACCO, Reginald; POPE, Daniel; EGGARS, J. M.; EFFINGER, Tom: Microbiologically Influenced Corrosion Investigations in Electric Power Generation Stations. Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1988.

TUOVINEN, Olli y CRAGNOLINO, Gustavo: A Review of Microbiological and Electrochemical Techniques in the Study of Corrosion Induced by Sulfate-Reducing Bacteria. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986.

VIDELA, H.A. HERRERA, L.K. "Studies in Surface Science and Catalysis" Publicado por Elsevier B.V. 2004

VIDELA, Hector: Electrochemical Interpretation of the Role of Microorganisms in Corrosion. Elsevier Science Publishers, 1988.

VOORDOUW, G.; NEMAT, M.; JENNEMAN, G. E. "Use of Nitrate-Reducing, Sulfide-Oxidizing Bacteria to Reduce Souring in Oil Fields: Interactions with SRB and Effects on Corrosion". NACE International, Houston, 2002.

WAGNER, Patricia A. RAY, Richard I. "Surface Analytical Techniques for Microbiologically Influenced Corrosion – A Review", *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*, ASTM 1232, Jeffery R. Kearns and Brenda J. Little, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp 153-169.

WARGIN, Alina; OLAŃCZUK-NEYMAN, Krystyna y SKUCHA, Monika: Sulphate-Reducing Bacteria, Their Properties and Methods of Elimination from Groundwater. Gdansk: Polish Journal of Environmental Studies.

WOODWARD, Janet H. "Bactericides, Fungicides, and Algicides" ASTM International, Biocide Group – Paper Technologies Division, Buckman Laboratories, Memphis, 2012.

YUZWA, Gerry Frank: Corrosion by Sulphate Reducing Bacteria. Calgary: 1991.

ANEXOS

ANEXO A. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE AGUA Y CONTENIDO DE METALES

POZO	Hora	pH	Temperatura Muestra (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Oxígeno disuelto (O ₂) (mg/L)	H ₂ S (mg/L)	CO ₂ (mg/L)
1	09:40 a.m.	7.39	43,5	35,8	2,6	0,5	1,25
2	01:40 p.m.	7.4	28,3	24,3	2,46	0	37,5
3	01:55 p.m.	7.19	36,5	24,3	4,2	0	105
4	10:20 a.m.	6.46	31,4	30,1	2,22	0	60
5	03:00 p.m.	7.27	59,1	36,1	2,44	0,3	100
6	09:50 a.m.	7.07	36,6	34,9	1,98	0,5	65
7	10:00 a.m.	6.81	37	36,4	2,03	0	70
8	11:56 a.m.	5.14	31,8	31,2	4,61	0	100
9	03:00 p.m.	7.7	37,6	30,9	3,97	0,3	60
10	10:50 a.m.	7.21	36,2	29,9	2,76	0,5	50

Parámetro	POZO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Turbiedad (NTU)	63	24	165	72	27	22	720	38	146	84
Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /L)	750	750	500	500	750	750	500	250	500	500
DBO ₅ (mg/L O ₂)	120	141	510	106	112	48	319	170	465	159
Sulfatos (mg/L SO ₄)	29,25	20,14	3,01	22,22	31,82	13,8	11,25	5,86	10,93	40,24
Cloruros (mg/L Cl)	1727	1583	1752	1158	3237	1787	790	15	2746	1626
Nitratos	0,107	<0,05	0,528	0,095	0,192	0,025	0,162	0,197	0,18	0,182
Sólidos disueltos	3570	3250	3378	2486	5194	3548	1929	289	5637	3446
Alcalinidad	648,38	648,38	443,46	443,46	648,38	648,38	443,46	238,55	443,46	443,46



MUESTRA	PARÁMETRO						
	HIERRO (Fe)	CALCIO (Ca)	MAGNESIO (Mg)	POTASIO TOTAL (K)	BARIO (Br)	ESTRONCIO (Sr)	SODIO (Na)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
POZO 1	1,03	165,73	26,12	91,75	3,12	43,06	1029,46
POZO 2	1,12	193,64	30,8	43,44	0,49	48,06	1486,5
POZO 3	7,97	157,03	26,08	33,46	2,85	40,09	898,59
POZO 4	1,58	231,14	12,93	35,31	0,01	11,03	7,8
POZO 5	2,97	414,39	38,65	65,25	0,04	21,43	1681,16
POZO 6	0,59	216,29	30,01	28	0,26	45,48	1122,06
POZO 7	1,17	124,9	10,15	16,23	2,63	29,93	429,61
POZO 8	6,87	21,31	0,75	14,13	0,26	0,71	15,82
POZO 9	4,92	226,72	23,51	85,8	1,31	39,71	520,3
POZO 10	4,4	219,67	24,51	81,1	1,45	38,42	1560,49

ANEXO B. MATRIZ DE RIESGO PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DE SOOKNAH

MATRIZ DE VALORACIÓN DE RIESGOS										
Pozo	S16	H8	H11	X-L5	K-5	XN6	B2	S26	E41	TZ7
pH	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Temperatura (°C)	9.9	8.3	9.2	8.6	5.3	9.2	9.2	8.7	9	9.1
Velocidad de Flujo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Régimen agrio/duice	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total de sólidos en suspensión (TSS)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Total de sólidos disueltos (TDS)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Potencial Redox	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LSI	1.4	1.2	0	0	1.6	0	0	5.9	1	0
Aplicación de Biocidas (sí o no)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Limpieza o Piggling (sí o no)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice numérico de susceptibilidad al MIC	5.7	5.4	5.4	5.3	5	5.4	5.4	6.3	5.5	5.4
índice de susceptibilidad al MIC	RIESGO ALTO	RIESGO MODERADO	RIESGO MODERADO	RIESGO MODERADO	RIESGO MODERADO	RIESGO MODERADO	RIESGO MODERADO	RIESGO ALTO	RIESGO MODERADO	RIESGO MODERADO