



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO I



ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE CORROSIÓN PRESENTES EN LÍNEAS DE
POZOS PRODUCTORES, CON ALTO POTENCIAL DE PRODUCCIÓN, DEL
CAMPO OPERACIONAL DACIÓN PERTENECIENTE AL DISTRITO SAN TOMÉ



Tutor Académico:
Prof. Francisco Yáñez

Tutor Industrial:
Ing. Noemí Roche

Presentado por:
Luis H. Orellana G.

TABLA DE CONTENIDO



- **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

- **ANTECEDENTES**

- **OBJETIVOS**

 - General

 - Específico

- **MARCO TEÓRICO**

 - Corrosión

 - Termodinámica de la Corrosión

 - Clasificación de la Corrosión

 - Tipos de Corrosión en la industria petrolera

 - Factores que influyen en la corrosión

 - Corrosión por CO_2

 - Corrosión por H_2S

 - Corrosión MIC

Corrosión-Erosión

Relación de Kane

Inhibidores de Corrosión

Clasificación de los Inhibidores de Corrosión

Correlaciones para fluido multifásico

- **METODOLOGÍA**

 - Inspección visual

 - Medición de Gases

 - Pruebas de Ultrasonido

 - Microscopia Electrónica de Barrido

 - Simulación hidrodinámica con PIPESIM

 - Simulación predictiva con Predict 4.0

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**UNIDAD DE
PRODUCCIÓN**

DACIÓN

Empresa

**PDVSA Exploración y
Producción División
Faja del Orinoco**

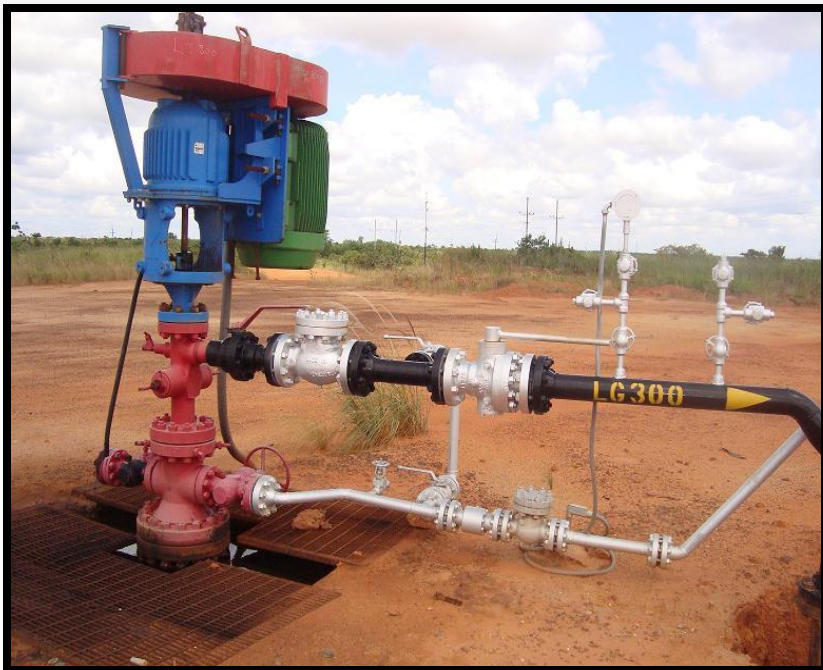


FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Líneas de 5 y/o 15 pozos individuales fluyendo a un múltiple
- Fluido multifásico con elevado corte de agua y sedimentos

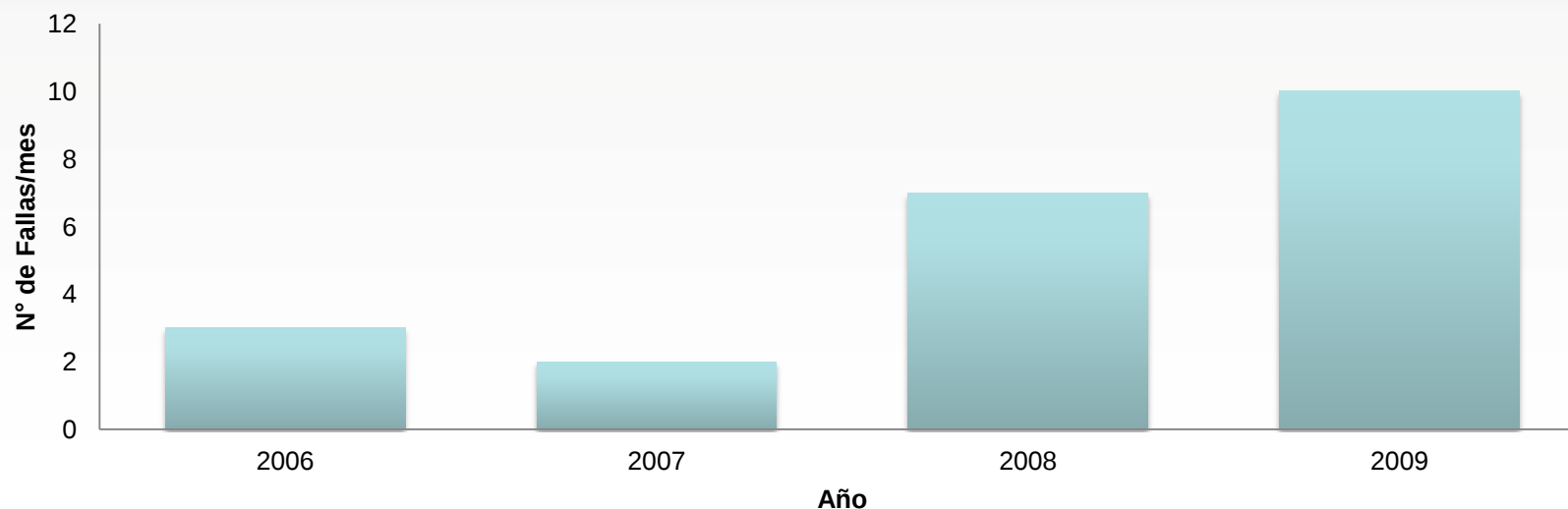


FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Frecuencia de Falla/mes promedio relacionado a Corrosión Interna en tuberías asociadas a pozos productores e inyectores del Campo Dación en el período 2006-2009



FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



Corrección de fuga
en línea de pozo
aérea de 4"



Sistemas de
tuberías con fallas
por corrosión



Corrección de fuga
en línea de pozo
aérea de 6"

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



ANTECEDENTES

En el año 2006, ROMERO Angelys (Ingeniería Química UDO). realizó estudios de tendencia corrosiva en los gasoductos asociados a las plantas compresoras críticas del área II del distrito San Tomé.

Conclusiones

- El mecanismo predominante de corrosión en dichos sistemas es por CO_2
- Las simulaciones y el conteo de hierro coinciden en niveles de corrosión leves o moderados por debajo de 5 mpy y un patrón de flujo predominante estratificado con ondas.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



ANTECEDENTES

En el año 2008, CABRERA Cesar (Ingeniería Química UDO) realizó un estudio de tendencia corrosiva en tuberías de 20plg del campo Dación.

Conclusiones

El mecanismo de degradación predominante es un mecanismo mixto, en donde primeramente ocurre el proceso de corrosión por CO_2 y luego las irregularidades en la superficie del metal ocasionadas por el proceso corrosivo, son eliminadas mediante el fenómeno de erosión en las líneas de transferencia.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



ANTECEDENTES

En el año 2009, URBAEZ Carlos (Ingeniería Química UCV)realizó un estudio integral de la corrosión en los pozos petroleros intervenidos en la campaña 2007-2008 en el campo Uracoa.

Conclusiones

- 77% de los pozos intervenidos presentaron daños por corrosión, de los cuales un 81% de los daños se presume corrosión localizada por bacterias.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



OBJETIVO GENERAL

Estudiar los mecanismos de corrosión presentes en líneas de pozos productores, del campo Operacional Dación perteneciente al Distrito San Tomé.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

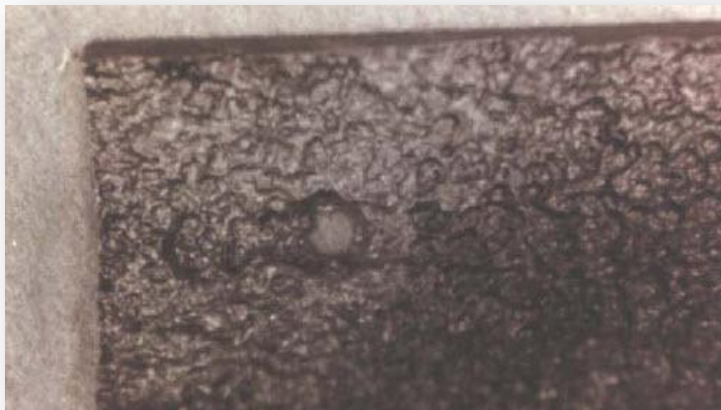
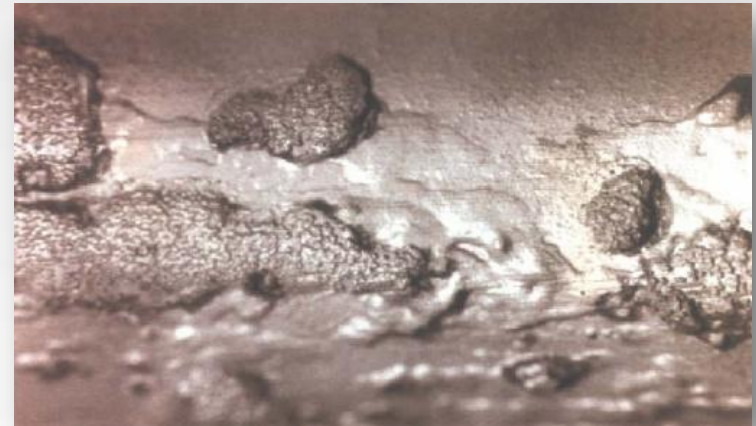
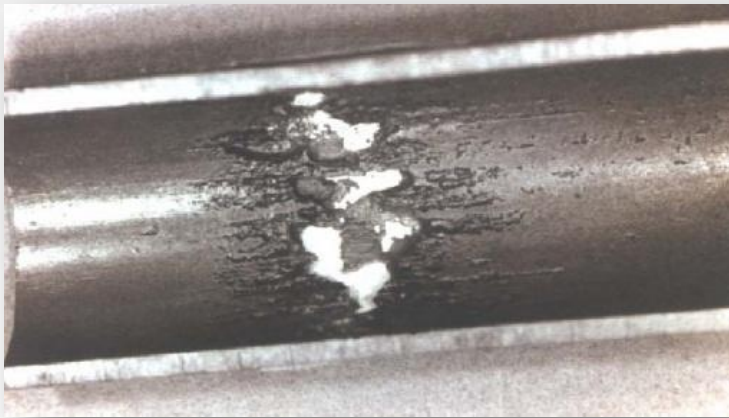
- 1. Realizar estudio de criticidad de los pozos productores activos que han presentado fallas por corrosión.**
- 2. Realizar análisis fisicoquímicos en los fluidos transportados por las tuberías**
- 3. Determinar la tendencia corrosiva y velocidades de corrosión de los pozos seleccionados, mediante simuladores predictivos (modelos predictivos).**
- 4. Evaluar un caso de falla en una tubería de producción para identificar el mecanismo de daño.**



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

5. **Determinar la velocidad de corrosión real a través de pruebas de ultrasonido.**
6. **Realizar una propuesta costo beneficio para las tuberías estudiadas comparando entre un programa de inyección de Inhibidor de Corrosión y/o el reemplazo de la tubería.**

CORROSIÓN





CORROSIÓN

Tabla N°1 Tipos de Falla en la Industria Petrolera

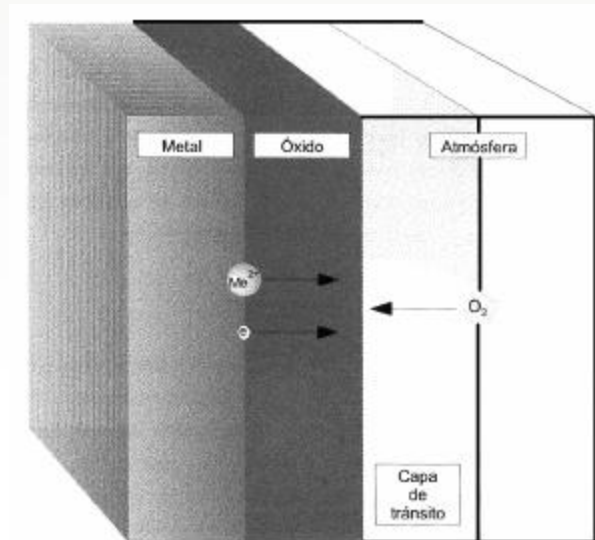
Tipos de Falla	Porcentaje(%)
Corrosión	33
Fatiga	18
Daño mecánico	14
Fractura frágil	9
Defecto de fabricación	9
Defecto de soldadura	7
Otros	10

Fuente: Kermamy, M. B. "Paper SPE 29748", BP Internacional, (1995)

CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN SEGÚN LA NATURALEZA QUÍMICA

Corrosión Química

Corrosión Seca u oxidación



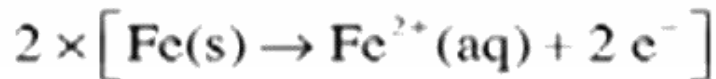
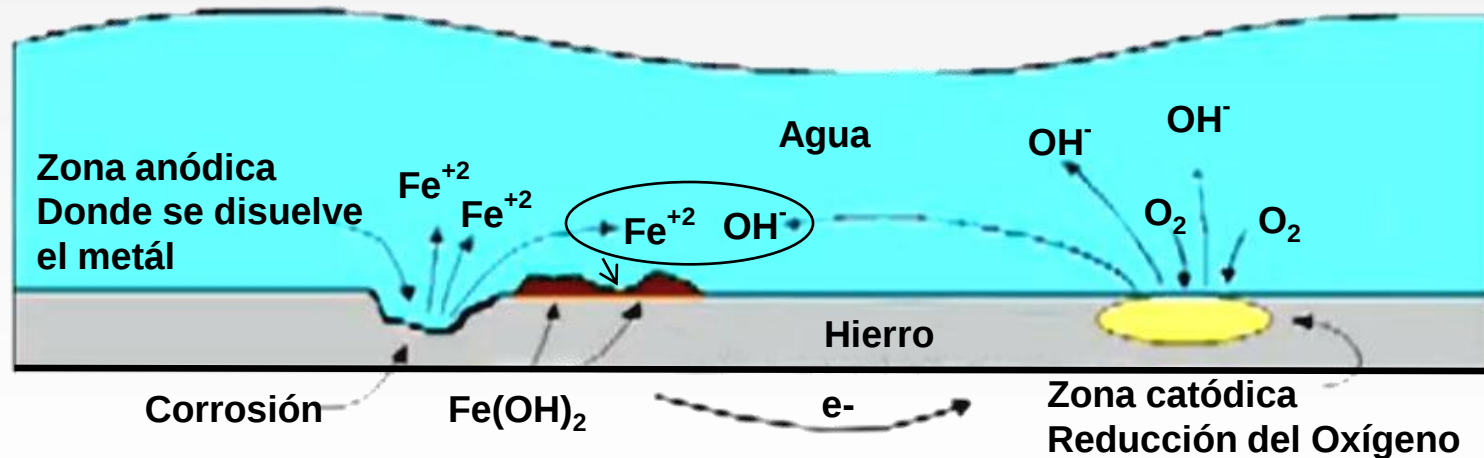
Corrosión con líquidos no electrolíticos

- Petróleo
- Gasolina
- Otros

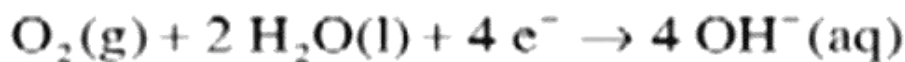
CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN SEGÚN LA NATURALEZA QUÍMICA

Corrosión Electroquímica

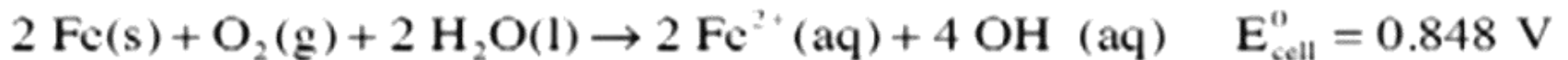
Celda de concentración



$$E_{\text{ox}}^0 = 0.447 \text{ V}$$



$$E_{\text{red}}^0 = 0.401 \text{ V}$$



TIPOS DE CORROSIÓN SEGÚN EL ATAQUE DE SUPERFICIE

Corrosión Uniforme

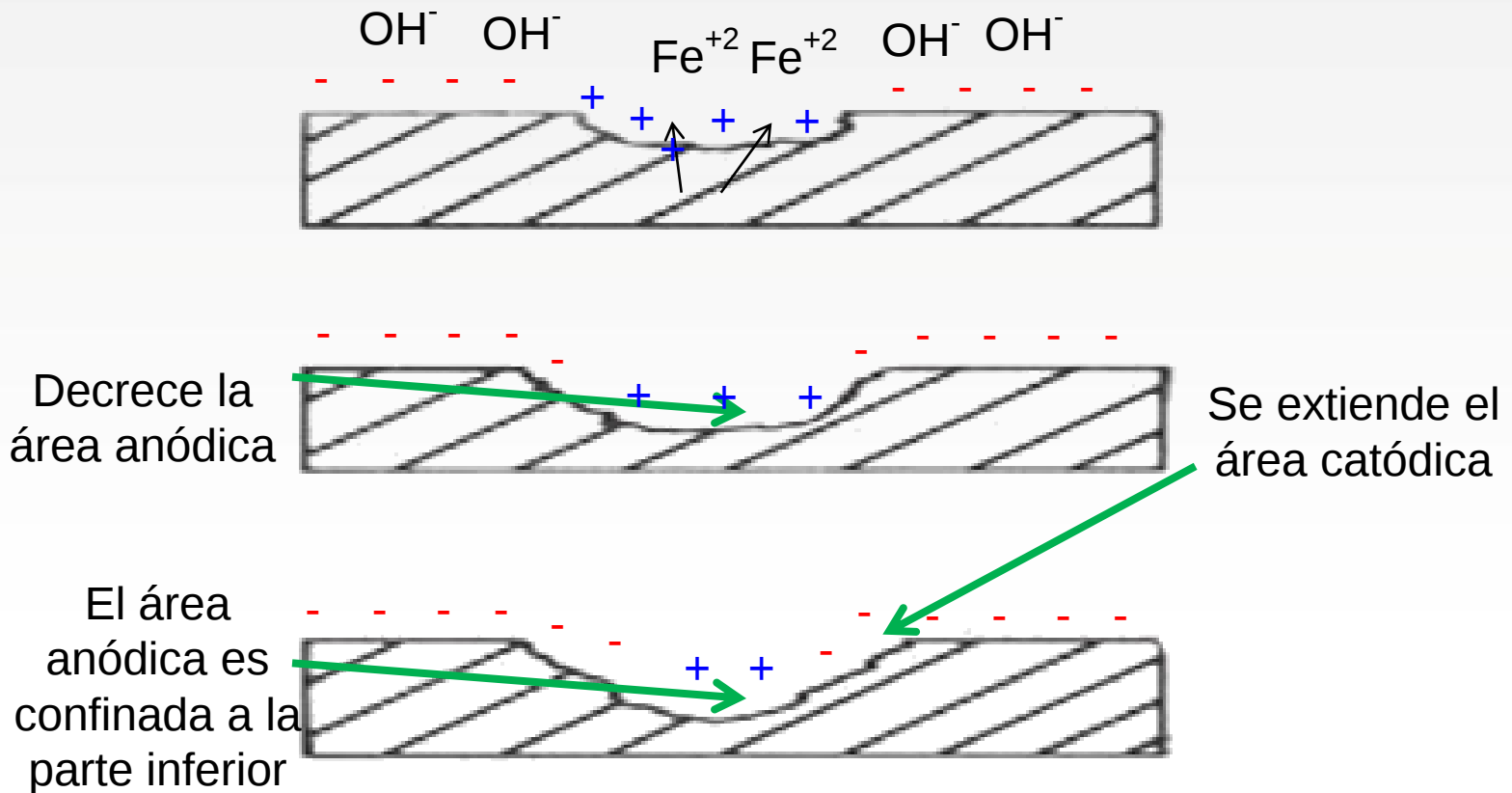


Corrosión Localizada



TIPOS DE CORROSIÓN SEGÚN EL ATAQUE DE SUPERFICIE

Corrosión por *pitting* o picadura





TERMODINÁMICA DE LA CORROSIÓN

Energía libre de Gibbs (ΔG) en términos electroquímicos

$$\Delta G = -nF \Delta E$$

En donde:

ΔG es la energía liberada.

n = números de electrones que participan en la reacción electroquímica.

F = constante de Faraday.

ΔE = fuerza electromotriz de la pila.

	Criterios
$\Delta G < 0$	Significa una disminución de la energía libre del sistema y muestra la probabilidad de transición al estado iónico en el caso de un metal
$\Delta G > 0$	indica un incremento de la energía libre del sistema, lo que implica que la reacción no se lleva a cabo en esa dirección
$\Delta G = 0$	se considera equilibrio termodinámico, esto es, NO habrá aumento o disminución en la concentración de los productos de corrosión formados

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

TEMPERATURA

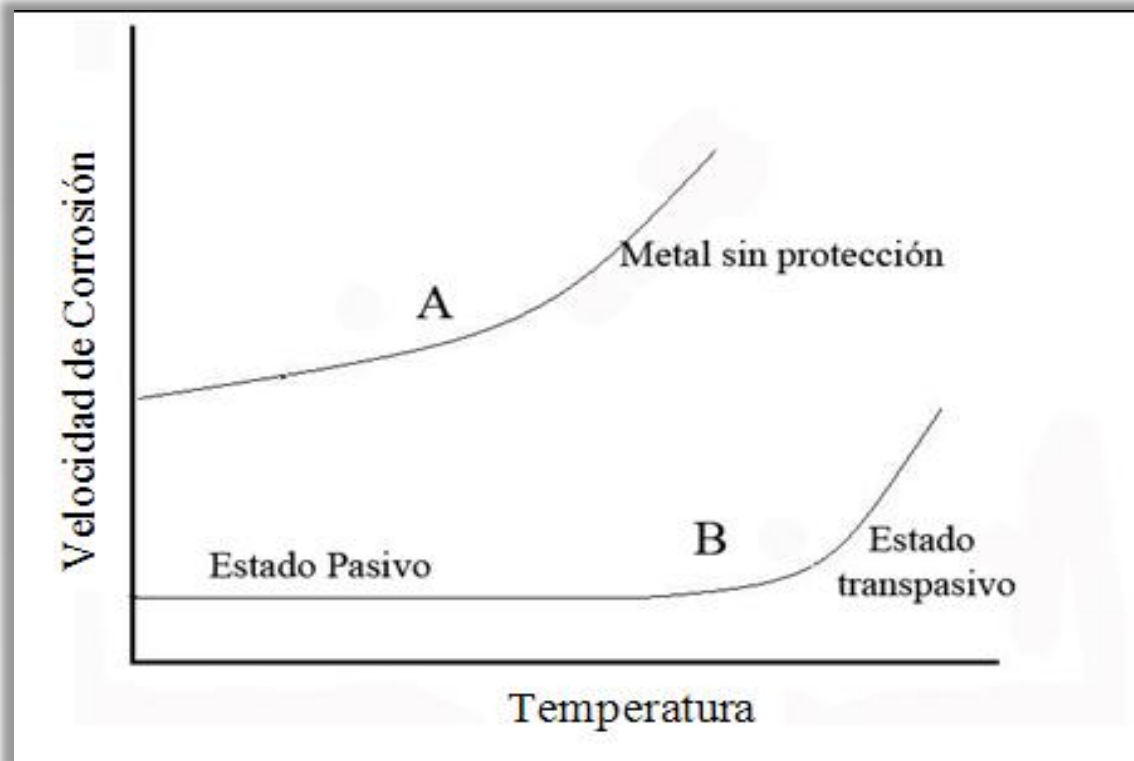


Gráfico N° 1 Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la temperatura



FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

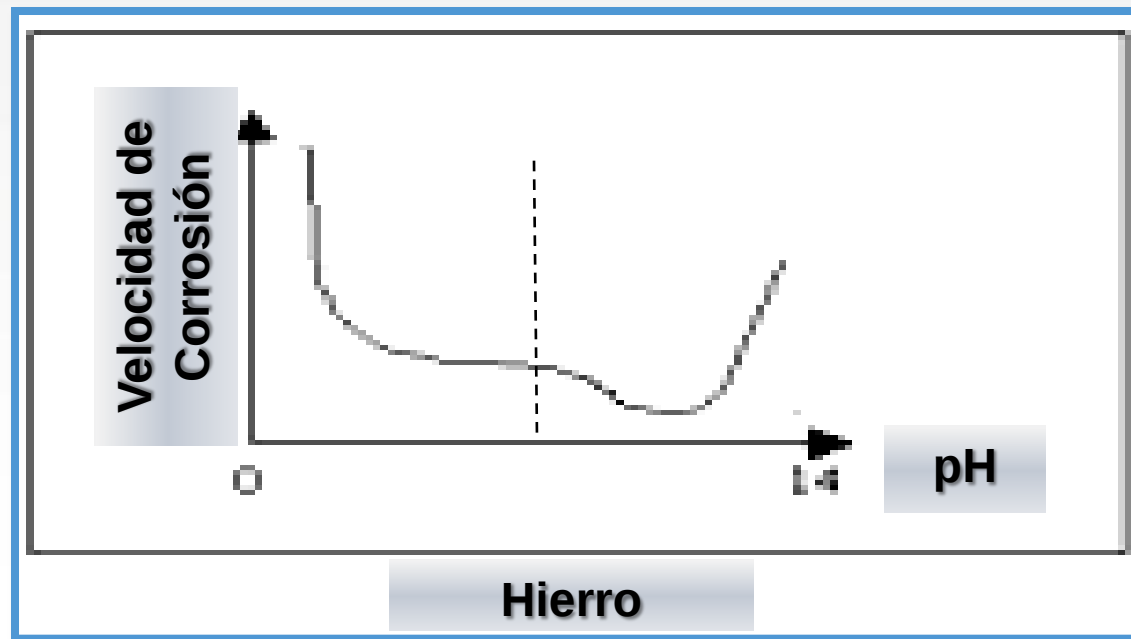
IÓN CLORURO

- Los productos de corrosión formados entre el metal y el ión cloruro son MUY solubles en agua
- El cloruro de sodio y otras sales son sustancias muy higroscópicas
- la presencia de cloruros en una solución acuosa disminuye la resistividad de dicha solución

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

Ph

Comportamiento de la tasa de corrosión con el aumento del pH





FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

Ph

Tabla 2 Tendencia corrosiva en función del pH

Rango de pH	Tendencia corrosiva
$\text{pH} \geq 7,0$	No corrosión
$6,5 < \text{pH} < 7,0$	Corrosión leve
$6,0 < \text{pH} < 6,5$	Corrosión moderada
$\text{pH} \leq 6,0$	Corrosión significativa

Nota: para velocidades del fluido menores o iguales a 3m/s, y bajas tasas de agua



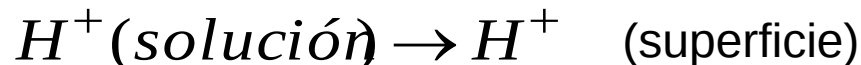
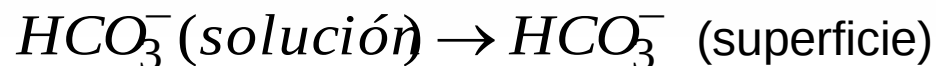
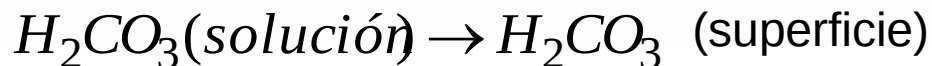
CORROSIÓN POR CO₂

MECANISMO DE REACCIÓN

Etapas I: Disolución de CO₂ en agua



Etapas II: transporte de los reactantes

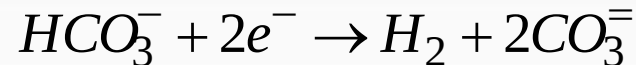
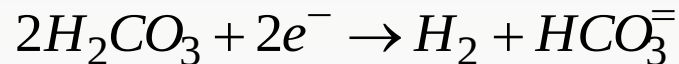
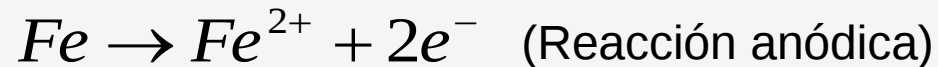




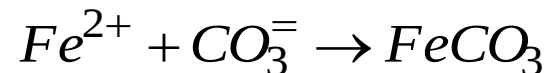
CORROSIÓN POR CO₂

MECANISMO DE REACCIÓN

Etapa III: Reacciones electroquímicas (anódicas y catódicas)



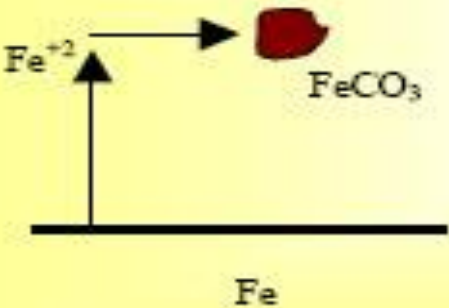
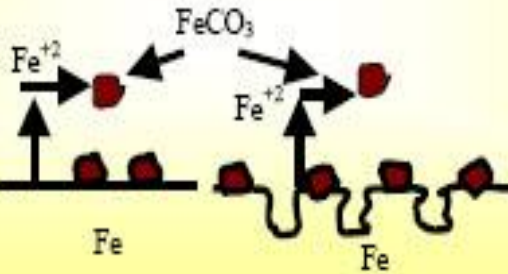
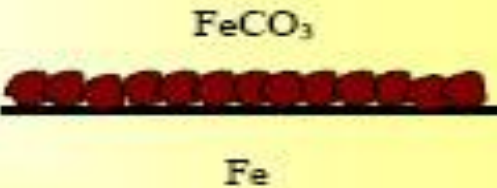
Etapa IV: Combinación de los iones carbonatos



Producto de Corrosión

CORROSIÓN POR CO_2

Tabla 3 Clasificación del mecanismo de Corrosión por CO_2

Tipo I ($T < 60^\circ\text{C}$ ó 140°F)	Tipo II ($\approx 100^\circ\text{C}$ ó 212°F)	Tipo III ($T > 150^\circ\text{C}$ ó 300°F)
		
Corrosión Homogénea	Corrosión Localizada	Se forma una capa protectora



CORROSIÓN POR CO₂

Efecto de la presión parcial

Tabla 4 Severidad de la corrosión por CO₂ en función de las presiones parciales según la Norma NACE SP-0106

Presión parcial CO ₂ (psia)	Severidad de la corrosión por CO ₂
$P_p < 3$	No es corrosivo
$3 \leq P_p \leq 30$	Puede ser corrosivo
$P_p > 30$	Corrosivo

$$P_p(CO_2) = X(CO_2) * P_T = \frac{\%CO_2 * P_T}{100}$$



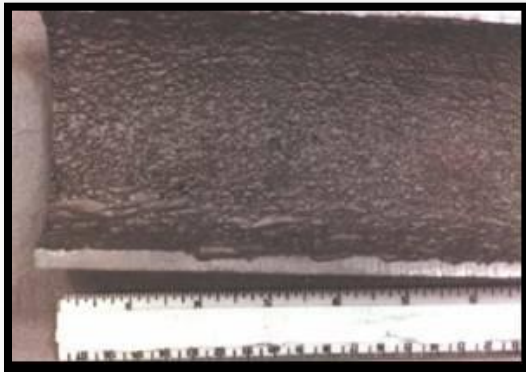
CORROSIÓN POR CO_2

FACTORES CRÍTICOS

- El aumento de la presión parcial de CO_2 resulta en pH más bajos y mayores tasas de corrosión.
- La corrosión ocurre en la fase líquida, a menudo en los lugares donde se condensa el CO_2 de la fase de vapor.
- El incremento de la temperatura aumenta la tasa de corrosión hasta el punto en que se vaporiza el CO_2 .

CORROSIÓN POR CO_2

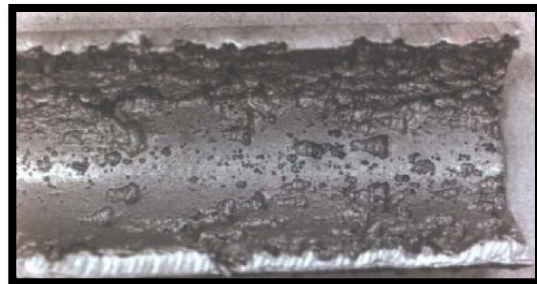
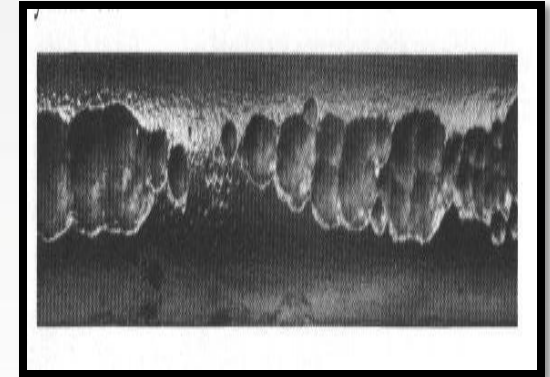
MORFOLOGÍA DEL DAÑO



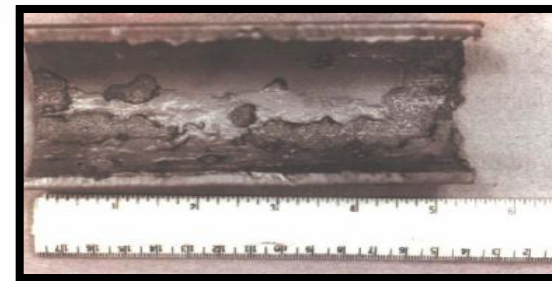
Uniforme



Corrosión localizada por *Pitting* o picadura



Ataque de gota de agua



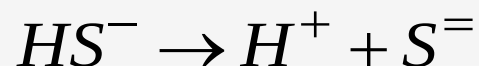
Ataque tipo mesa



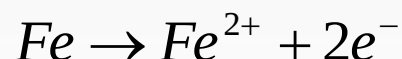
CORROSIÓN POR H_2S

MECANISMO DE REACCIÓN

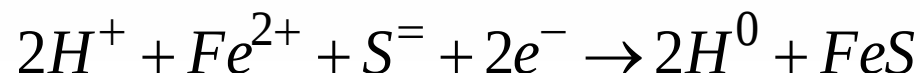
Etapas I: Doble disociación



Etapas II: Disolución del hierro



Etapas III: Formación del sulfuro de hierro





CORROSIÓN POR H_2S

TIPO DE CORROSIÓN POR H_2S

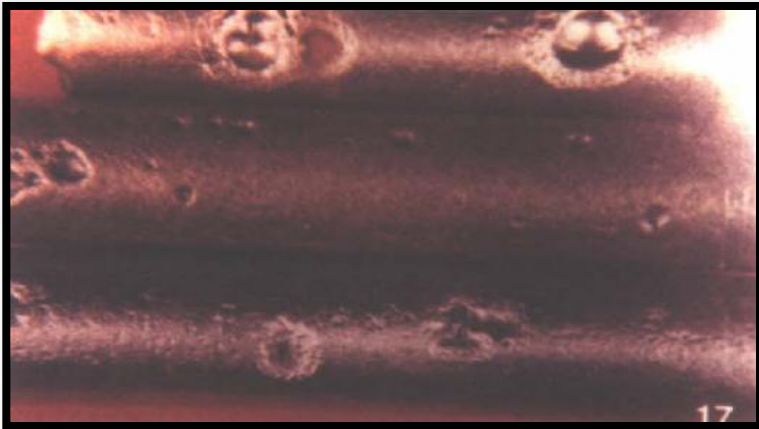
Tabla 5 Tipo de corrosión por H_2S en función de las presiones parciales según la Norma NACE MR-0175

Presión parcial H_2S (psia)	Tipo de corrosión por H_2S
$P_p \geq 0,05$	SCC(Stress Corrosion Cracking)
$P_p \geq 0,1$	General por H_2S

$$P_p(H_2S) = P_t * ppm H_2S / 1 \times 10^6$$

CORROSIÓN POR CO_2

MORFOLOGÍA DEL DAÑO



Corrosión localizada por H_2S



Corrosión uniforme por H_2S



SCC(Stress Corrosion Cracking)

CORROSIÓN-EROSIÓN

DEFINICIÓN Y MORFOLOGÍA DEL DAÑO



Erosión de Cola de cometa



CORROSIÓN-EROSIÓN

FACTORES CRÍTICOS

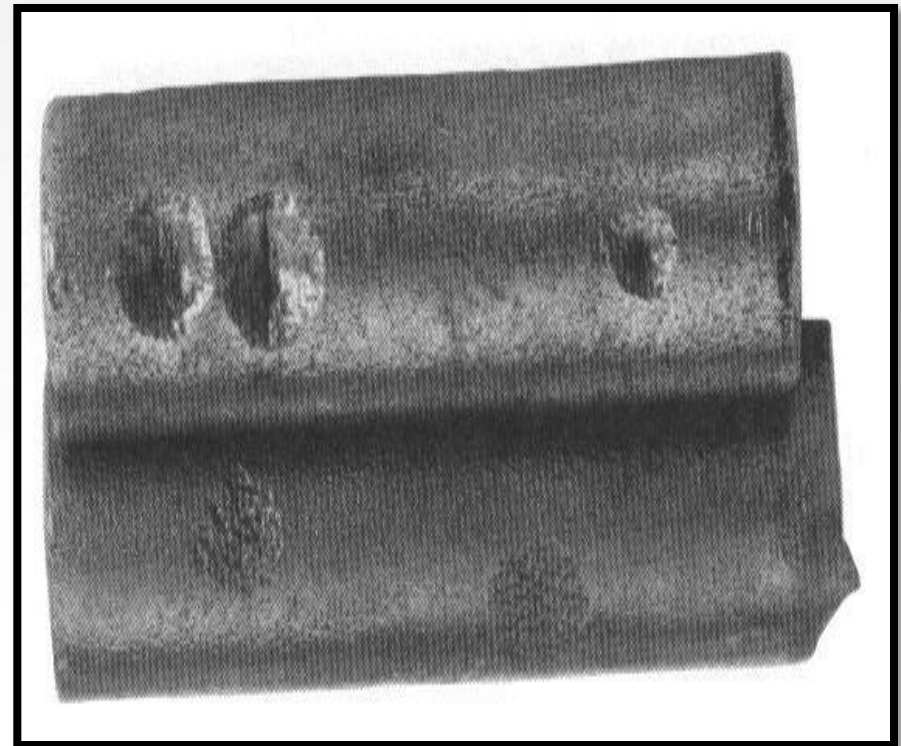
- La velocidad, la concentración de los medios de impacto(es decir, partículas, líquidos, gotas, lodos, flujo de dos fases), el tamaño, la dureza y la resistencia a la corrosión de los materiales sometidos a la erosión, y el ángulo de impacto.
- El aumento de la agresividad del medio ambiente
- Aumento de temperatura, pH, etc, puede aumentar la susceptibilidad a la pérdida de metal.

CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA INDUCIDA (MIC)

DEFINICIÓN Y MORFOLOGÍA DEL DAÑO



Efecto Terraza





CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA INDUCIDA (MIC)

FACTORES CRÍTICOS

- **Medios acuosos o servicios**
- **Los microorganismos pueden sobrevivir y crecer en condiciones difíciles, entre ellas la falta de oxígeno, la luz o de oscuridad, la alta salinidad, pH de 0 a 12, y las temperaturas de 0 F a 235 F (-17 °C a 113°C).**
- **Los sistemas pueden llegar a ser "inoculados" por la introducción de organismos que se multiplican y se extienden a menos que sean controlados.**
- **Los diferentes organismos prosperan alimentándose de nutrientes como las sustancias inorgánicas y de sustancias orgánicas**



CORROSIÓN COMBINADA DE CO_2 Y H_2S

RELACIÓN DE KANE DE PRESIONES PARCIALES

$$\frac{P_p \text{CO}_2}{P_p \text{H}_2\text{S}} > 200$$

Tendencia de Corrosión por CO_2

$$\frac{P_p \text{CO}_2}{P_p \text{H}_2\text{S}} < 200$$

Tendencia de Corrosión por H_2S

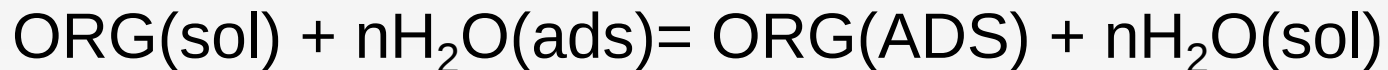
$$P_p(\text{CO}_2) = X(\text{CO}_2) * P_T = \frac{\% \text{CO}_2 * P_T}{100}$$

$$P_p(\text{H}_2\text{S}) = P_t * \text{ppm H}_2\text{S} / 1 \times 10^6$$

INHIBIDORES DE CORROSIÓN

MECANISMO DE ACCIÓN DEL INHIBIDOR

Según Bockris ocurre la siguiente reacción



Donde

n: número de moléculas de agua removidas del metal por cada molécula de inhibidor adsorbido





CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

- **Inhibidores pasivantes**
- **Inhibidores Fílmicos**
- **Inhibidores Neutralizantes**
- **Inhibidores de interfase**
- **Otros inhibidores**
 - **Biocidas**
 - **Anti-Incrustantes**



CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

INHIBIDORES PASIVANTES

Inhibidores Oxidantes

Cromatos

Nitratos

Inhibidores No oxidantes

Fosfatos

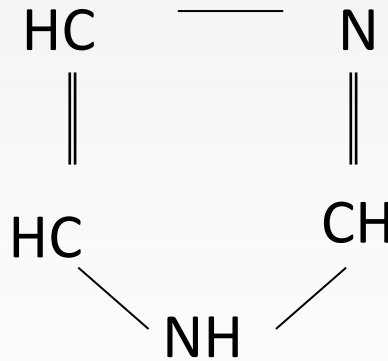
Tungstato

Molibdato



CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Inhibidores Fílmicos



Estructura de un inhibidor fílmico: Imidazolina



CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

INHIBIDORES NEUTRALIZANTES

Inorgánicos

- Gas amoniacal
- Hidróxido de amonio
- Cloruro de amonio

Orgánicos

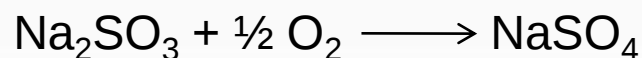
- Morfolina
- Etanol amina
- Dietil amina
- Cicloexil Amina



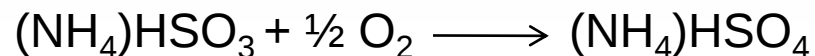
CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

SECUESTRANTE DE OXÍGENO

Sulfito de Sodio



Sulfito de Amonio





CORRELACIONES PARA FLUIDOS MULTIFÁSICOS

Beggs and Brill 1973

**Tabla Criterios para conocer el patrón de flujo
según *Beggs and Brill 1973***

Patrón de Flujo	Criterio
Segregado	$(\lambda_L < 0,01 \text{ y } Fr < L_1) \text{ ó } (\lambda_L \geq 0,01 \text{ y } Fr < L_2)$
Transición	$\lambda_L \geq 0,01 \text{ y } (L_2 \leq Fr \leq L_3)$
	$((0,01 \leq \lambda_L \leq 0,4) \text{ y } (L_3 < Fr \leq L_1)) \text{ ó }$
Intermitente	$((\lambda_L \geq 0,4) \text{ y } (L_3 < Fr \leq L_4))$
Distribuido	$(\lambda_L < 0,4 \text{ y } Fr \geq L_1) \text{ ó } (\lambda_L \geq 0,4 \text{ y } Fr > L_4)$



CORRELACIONES PARA FLUIDOS MULTIFÁSICOS

Beggs and Brill 1973

Parámetros en función del *Holdup* sin deslizamiento

$$L_1 = 316 \cdot \lambda_L^{0,302}$$

$$L_2 = 9,252 E - 4 \cdot \lambda_L^{-2,4684}$$

$$L_3 = 0,10 \cdot \lambda_L^{-1,4516}$$

$$L_4 = 0,5 \cdot \lambda_L^{-6,738}$$

Retención de líquido (*Holdup*)
sin deslizamiento

$$\lambda_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_G}$$

Número de Froude



CORRELACIONES PARA FLUIDOS MULTIFÁSICOS

Beggs and Brill 1973

Caída de presión

$$\Delta P = (\Delta P)_G + (\Delta P)_F + (\Delta P)_A$$

Pérdida por Gravedad	Pérdida por fricción	Pérdida por aceleración
$(\Delta P)_G = \rho_s \cdot g$ $\rho_s = \rho_L \cdot H_L + \rho_G \cdot H_G$	$(\Delta P)_F = \frac{f \cdot \rho_m \cdot v_m^2}{2 \cdot D}$	$(\Delta P)_A = \frac{\rho_s \cdot v_m \cdot v_{SG}}{P} \cdot \Delta P$

$(\Delta P)_G$ = pérdidas por gravedad
pl= Densidad del líquido
pg= Densidad del Gas
 H_L = Holdup del líquido
 H_G = Holdup del Gas
ps= Densidad superficial

$(\Delta P)_F$ = pérdidas por fricción
pm= Densidad de la mezcla
vm= Velocidad de la mezcla
D= Diámetro
f= factor de fricción

$(\Delta P)_A$ = pérdidas por Aceleración
ps= Densidad superficial
vm= Velocidad de la mezcla
vSG= Velocidad superficial del Gas
P= presión de entrada



CORRELACIONES PARA FLUIDOS MULTIFÁSICOS

Beggs and Brill 1973

Retención de líquido (*Holdup*) para tuberías horizontales

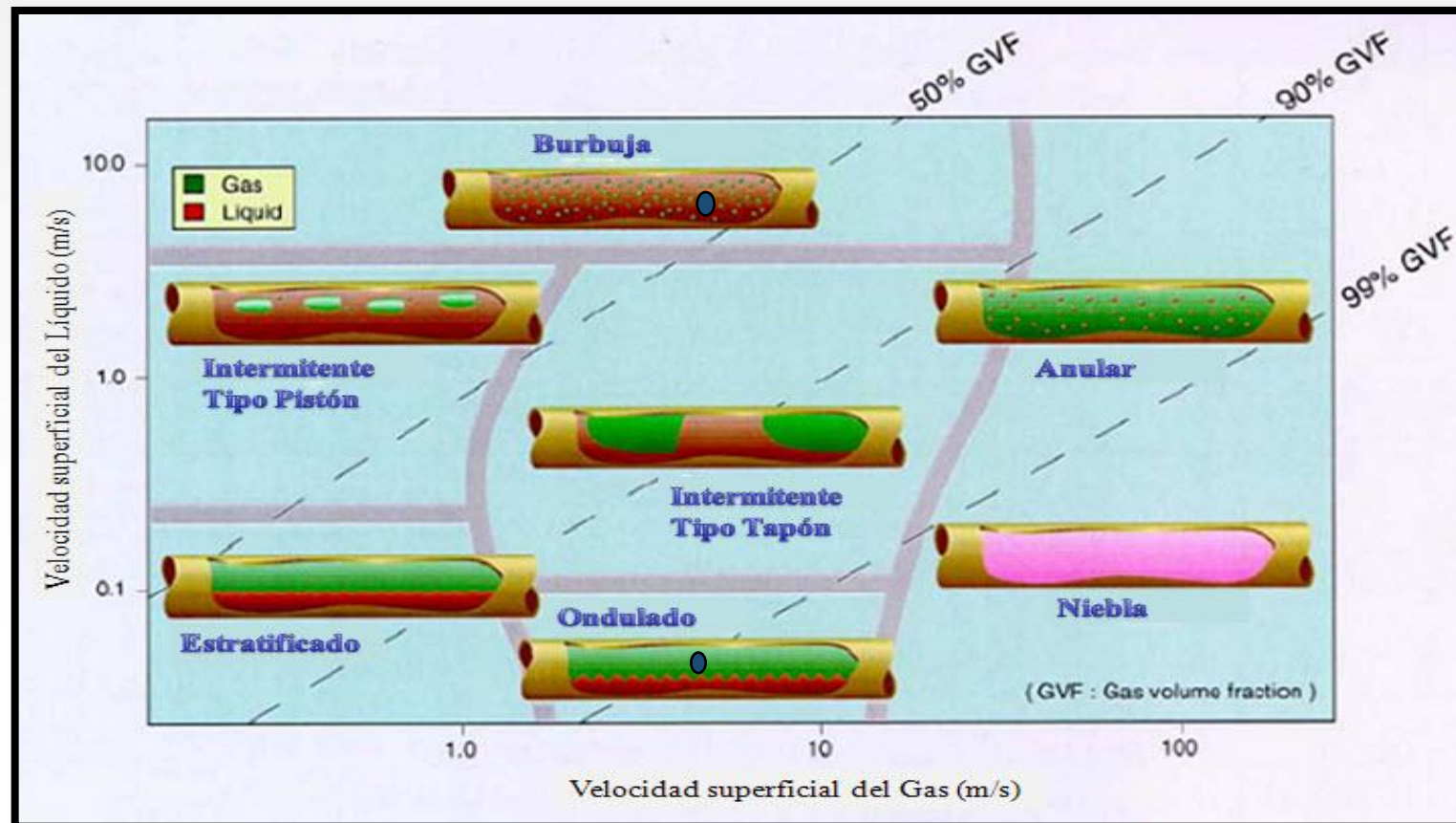
$$H_L|_{\theta=0} = \frac{a \cdot \lambda_L^b}{Fr^c}$$

Constantes para el cálculo del *Holdup*

Patrón	a	b	c
Segregado	0,98	0,4846	0,0868
Intermitente	0,845	0,5351	0,0173
Distribuido	1,605	0,5824	0,0609

CORRELACIONES PARA FLUIDOS MULTIFÁSICOS

Mapa de *Taitel dukler*





CORRELACION DEWAARDS AND MILLIAMS 1995

$$V_{corr} = \frac{V_D \cdot V_r \cdot f_c \cdot f_s \cdot f_{cr}}{V_D + V_r \cdot f_c}$$

Donde:

V_{corr} : velocidad de corrosión (mmpy)

V_D : velocidad de corrosión controlada por transferencia de masa (mmpy)

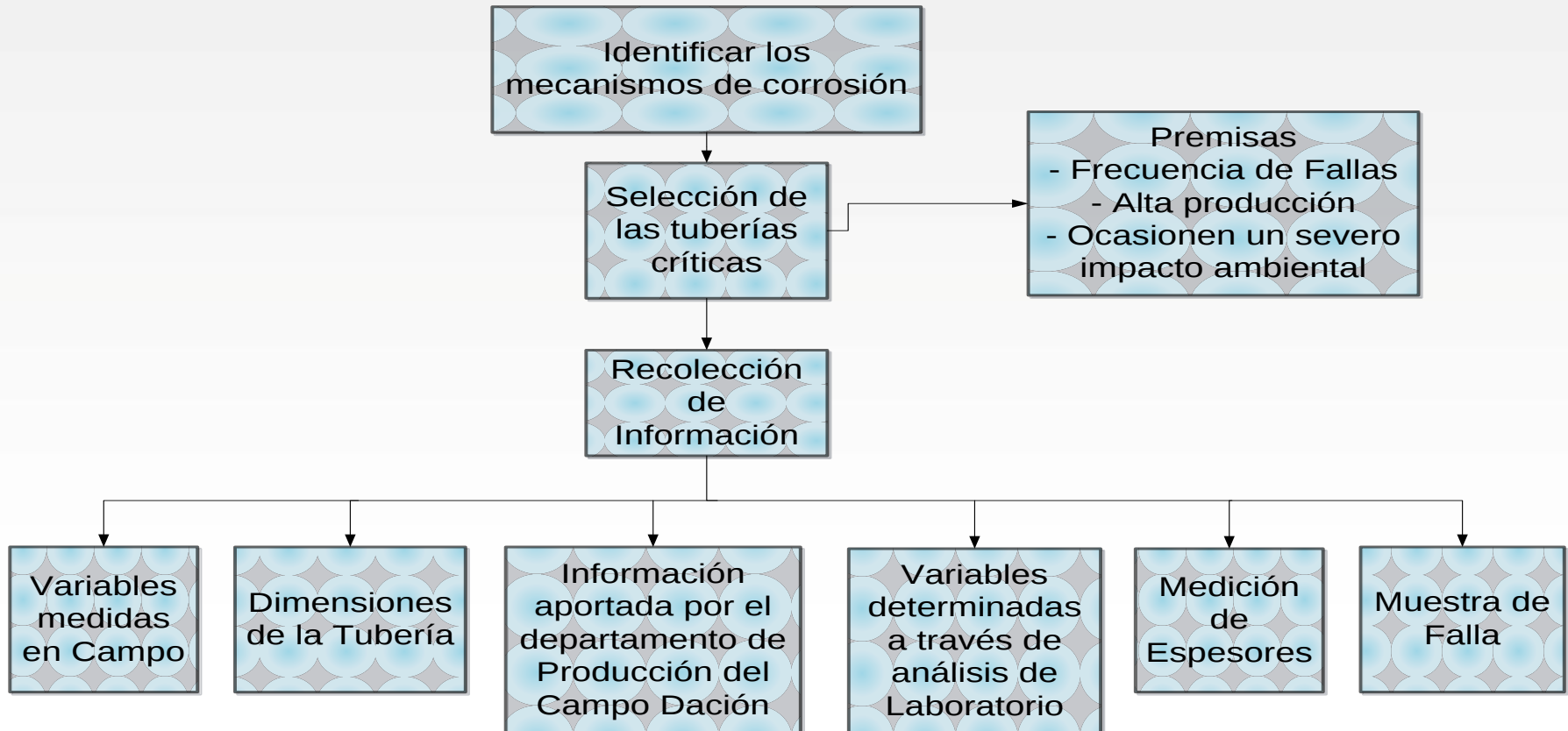
V_r : velocidad de corrosión controlada por la reacción (mmpy)

f_s : factor de corrección por formación de capa de carbonato de hierro (FeCO_3)

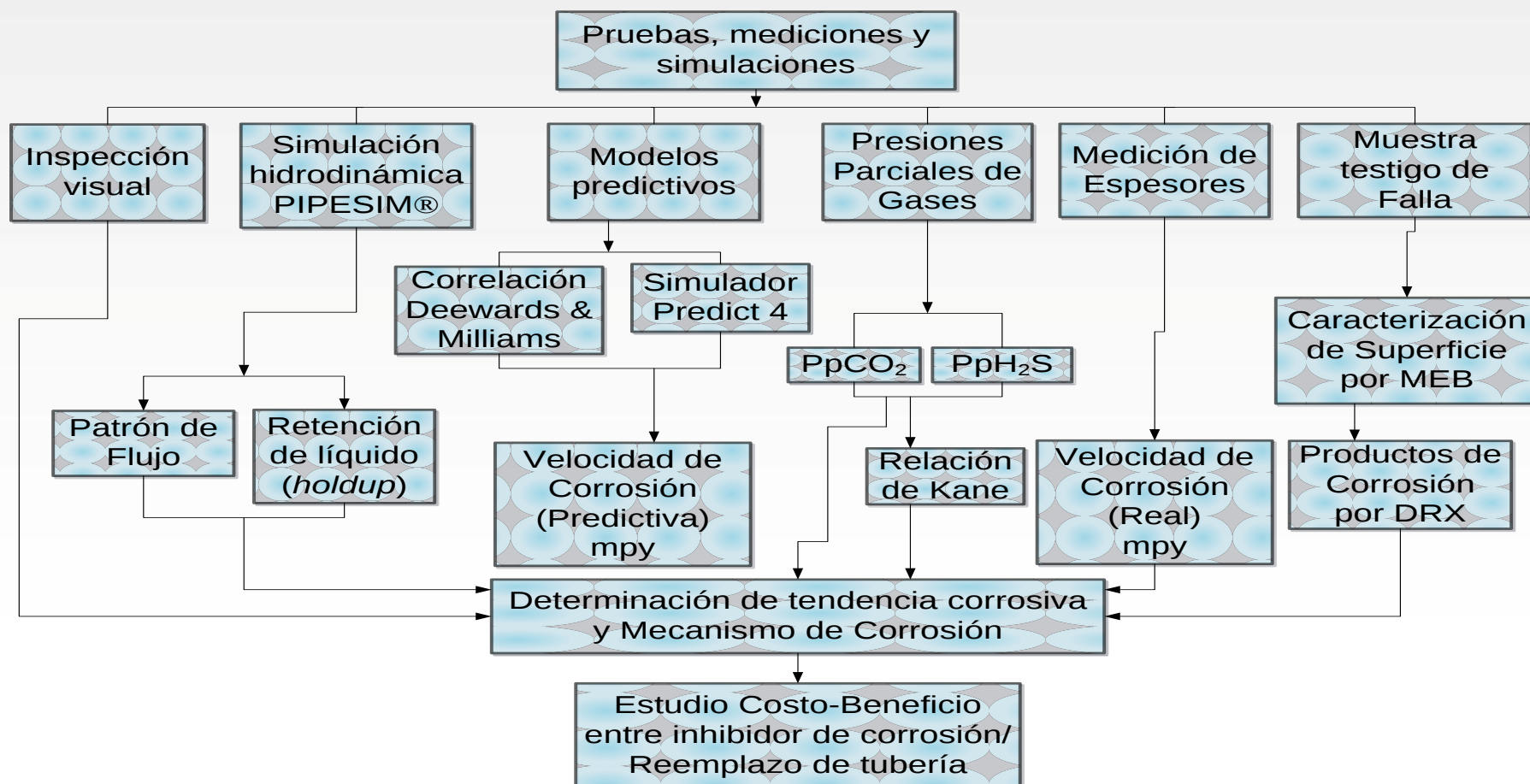
f_c : factor de corrección por contenido de hierro en el acero.

f_{cr} : factor de corrección por contenido de cromo en el acero.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA METODOLOGÍA

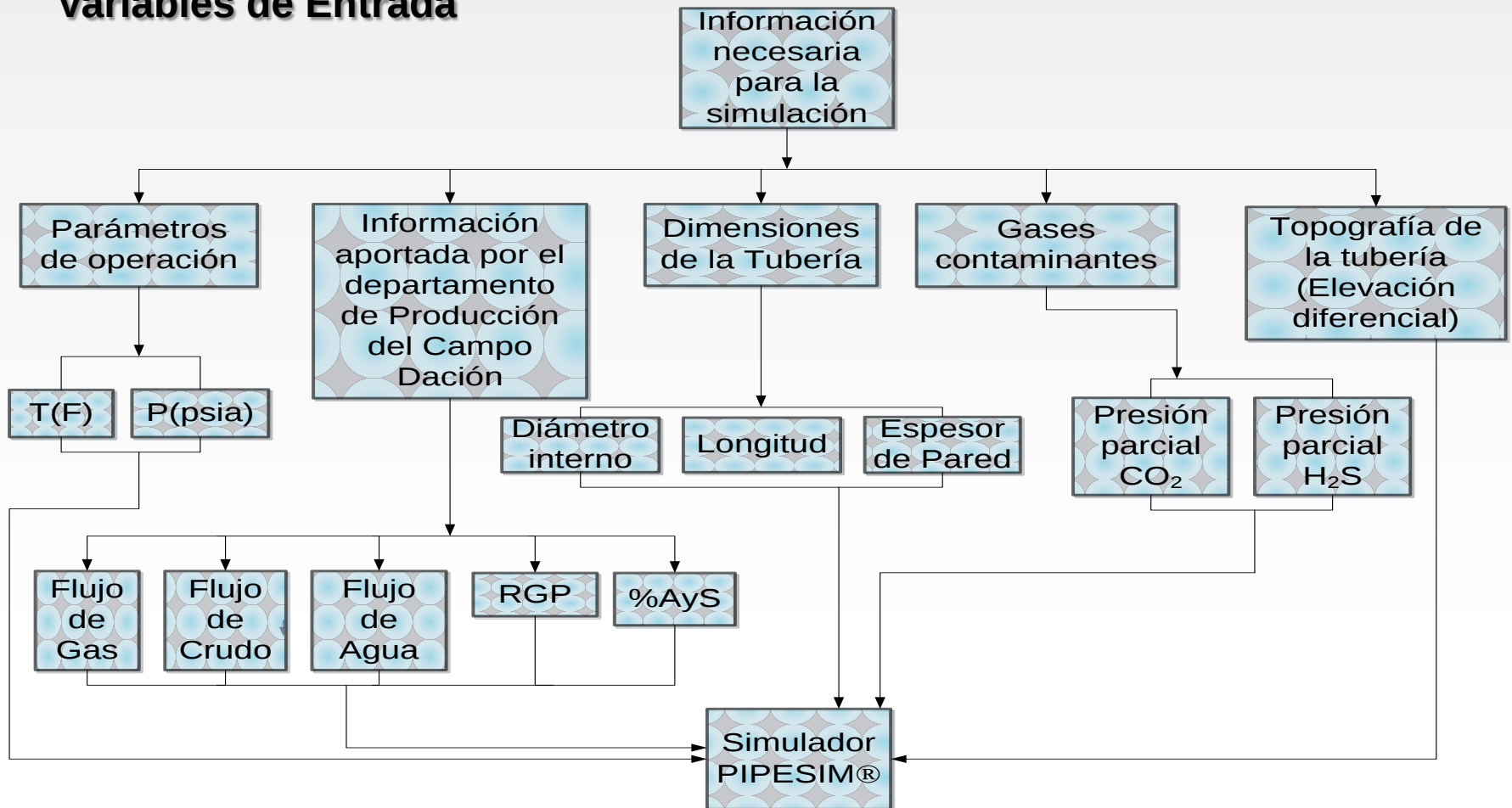


PRUEBAS DE CAMPO, MEDICIONES Y SIMULACIONES



SIMULACIÓN EN PIPESIM

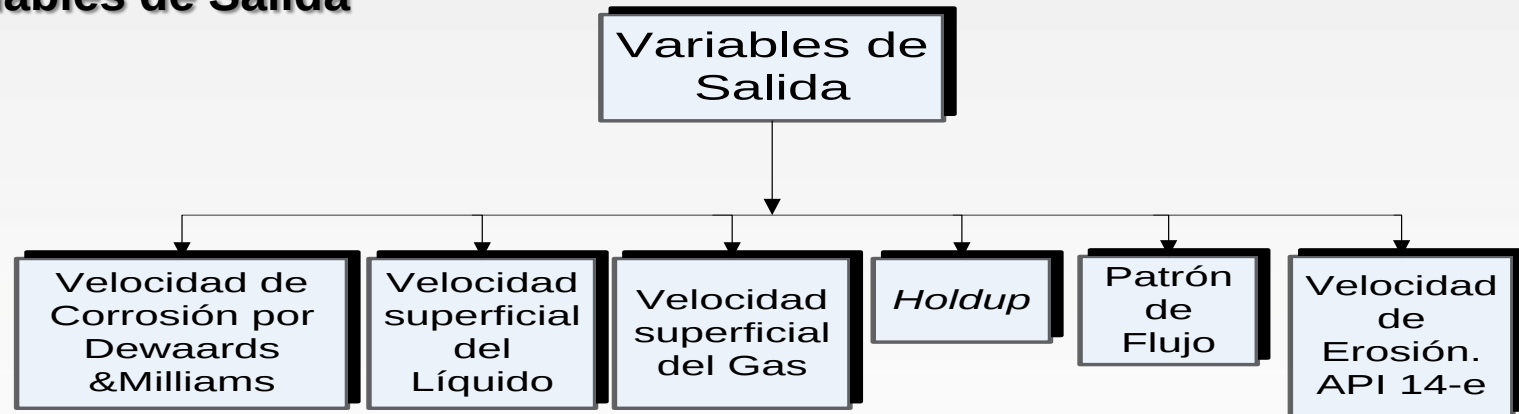
Variables de Entrada





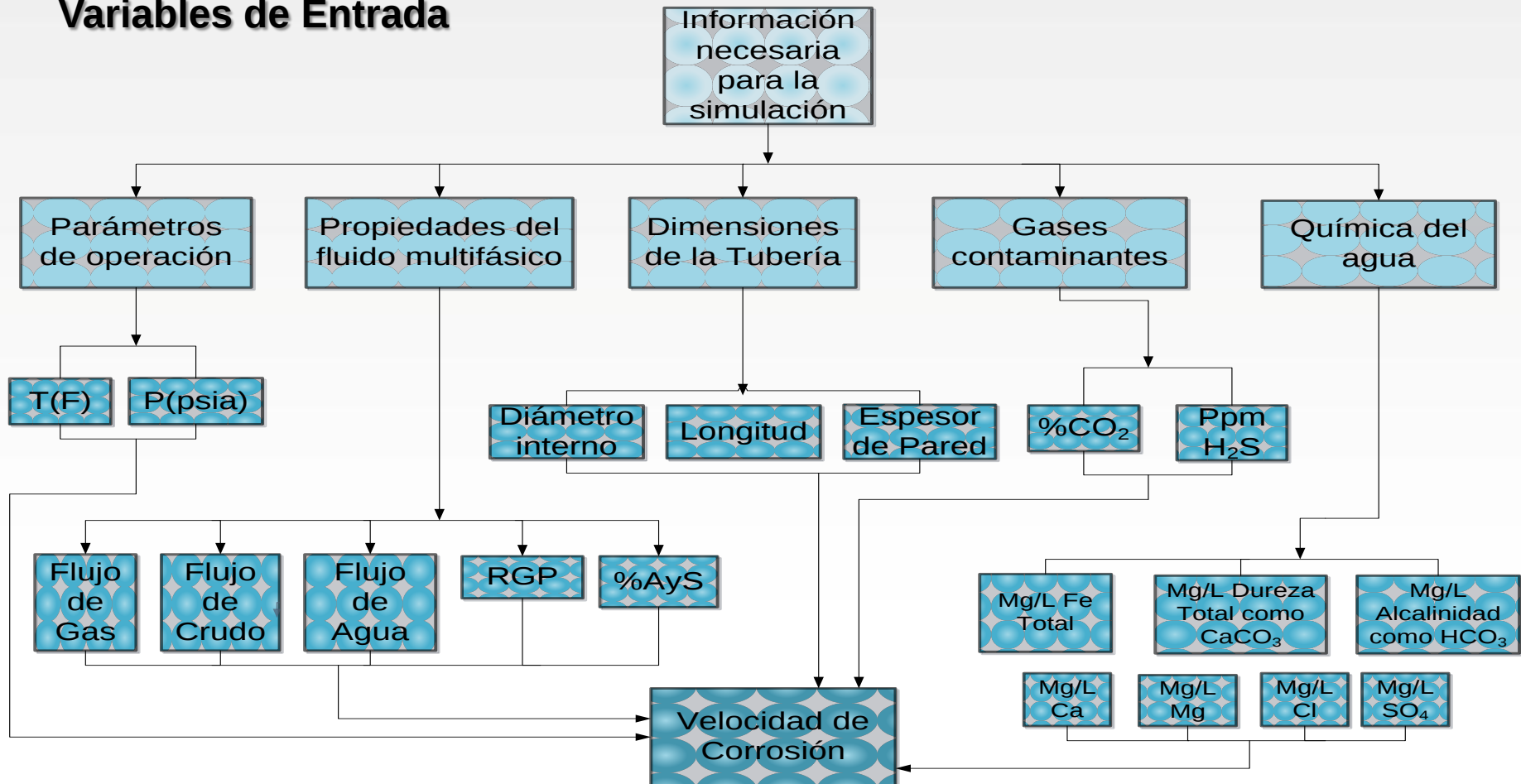
SIMULACIÓN EN PIPESIM

Variables de Salida



SIMULACIÓN EN PREDICT 4.0

Variables de Entrada



INSPECCIÓN VISUAL

Permite describir parámetros de importancia que dan una idea del mecanismo De corrosión



Corrección en
Codo de 45°



Cambio de
dirección del
fluido

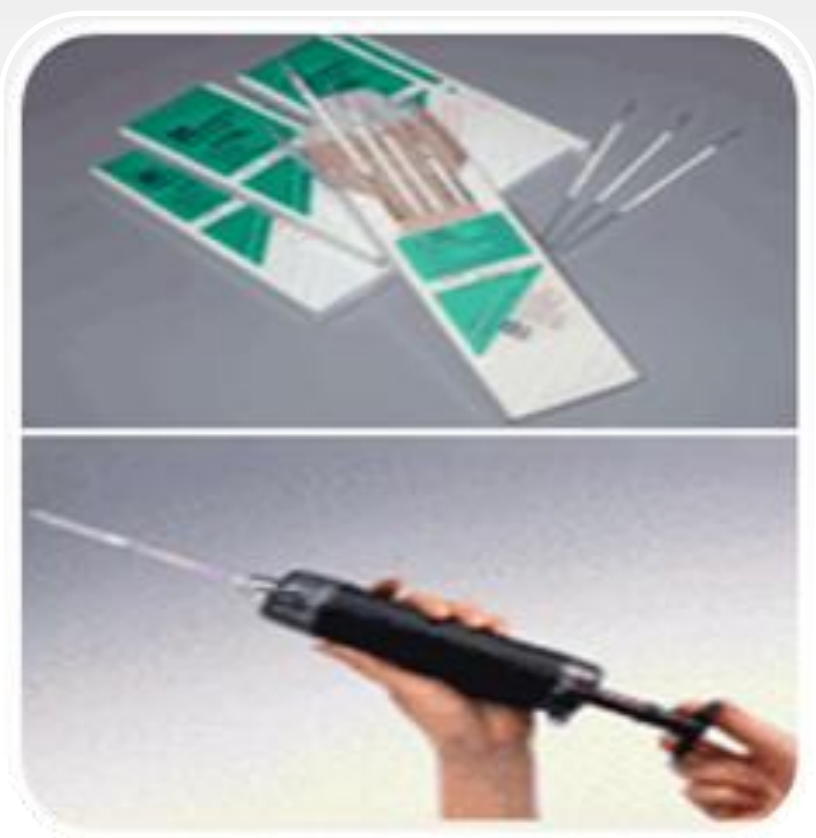


Tubería no
soportada

MEDICIÓN DE GASES



Ampollas colorimétricas



Bomba gastec

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

- Determinación del pH
- Dureza Total
- Alcalinidad HCO_3^-
- Alcalinidad CO_3^-
- Determinación de Ca^{+2} y Mg^{+2}
- Determinación del Ión Cloruro
- Determinación del Ión Hierro
- Determinación de los Sulfatos

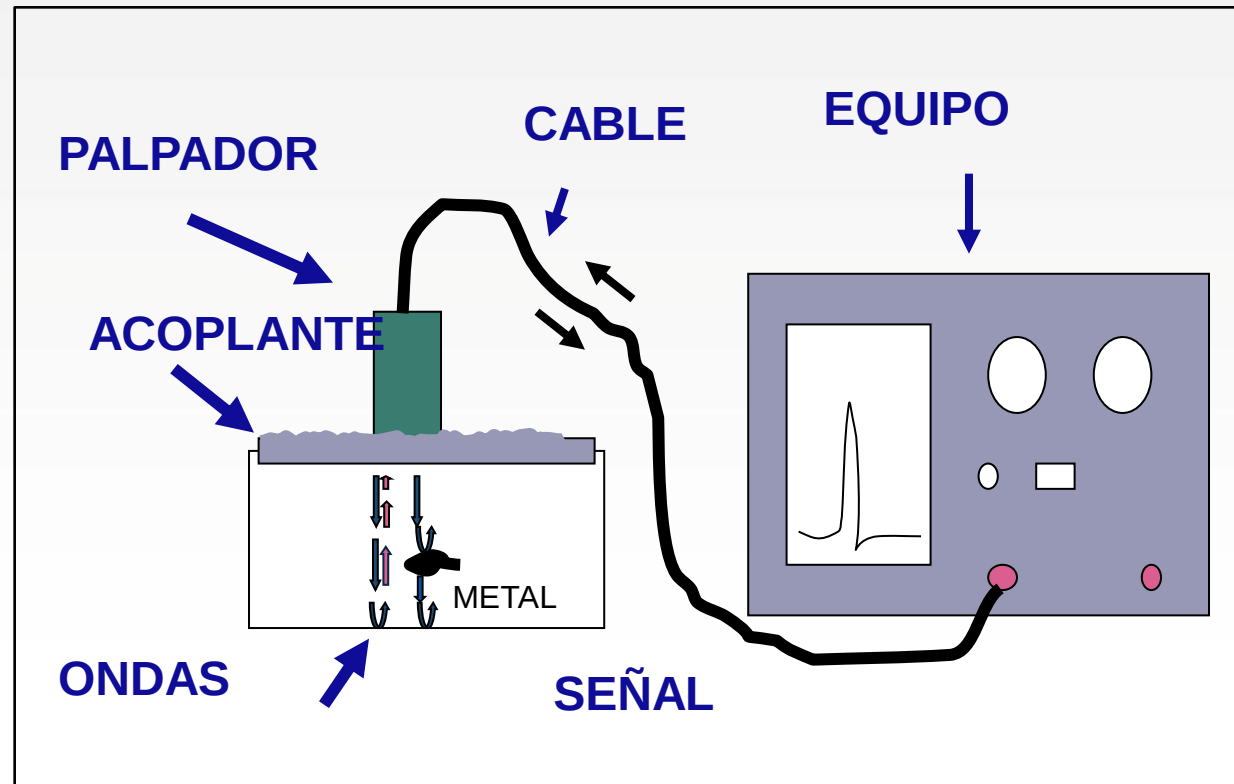


MEDICIÓN DE ESPEORES: PRUEBAS DE ULTRASONIDO (UT)

Esquema de funcionamiento



DM4 DL Krautkramer



CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN: MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Esquema de funcionamiento

