



SIMULACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL AISI 1020 BAJO CONDICIONES DE CORROSIÓN-EROSIÓN

Investigador principal:
Juan José Triana Chaves

Tutor de investigación:
PhD. Mg. Ing. Ángela Bermúdez Castañeda

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2020

SIMULACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL AISI 1020 BAJO CONDICIONES DE CORROSIÓN-EROSIÓN

Investigador principal:
Juan José Triana Chaves

Tutor de investigación:
PhD. Mg. Ing. Ángela Bermúdez Castañeda

Proyecto de investigación

Línea de Investigación:
Desgaste de materiales
Grupo de Investigación:
Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica (DSIM)

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2020

DEDICATORIA

*A mis padres
y mis hermanos*

*“Lo contrario a la valentía en nuestra
Sociedad no es la cobardía,
Es la conformidad.”*

Rollo May

Agradecimientos

Este proyecto lo dedico con cariño a mis padres José Triana y Ruby Chaves, quienes siempre se han esforzado y sacrificado porque yo sea una persona que aporte a la sociedad tanto intelectual como integralmente. Manteniéndolos siempre en mis pensamientos por los buenos deseos y la energía que me daban para continuar y sacar adelante cada cosa que me proponía.

A mis hermanos quienes siempre han sido una guía y han marcado un camino por el cual he esta siguiendo, además, siempre están aconsejándome según las experiencias vividas por ellos y sé que juntos se podremos lograr cosas importantes.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y a todos los docentes y compañeros que hicieron parte de mi formación integral e intelectual porque siempre se esforzaron por dar lo mejor de sí y demostrar siempre su máxima capacidad de enseñanza, entendimiento e investigación.

Resumen

Las turbinas eólicas son dispositivos importantes en la generación de energía limpia en lugares donde existen corrientes de aire aprovechables. Sin embargo, estos aerogeneradores son fácilmente afectados por el fenómeno de corrosión-erosión dadas las condiciones ambientales, tales como: la presencia de partículas y agentes agresivos en el ambiente, así como la humedad propia del trópico.

En este trabajo dos modelos de erosión y corrosión previamente desarrollados fueron analizados y adaptados a las condiciones ambientales representativas de al menos dos lugares. Siendo, La Guajira el más importante dada su agresividad. Con base en lo anterior se tomaron como condiciones: la velocidad de impacto de 15m/s, tamaño de partícula de 375 μ m, Porcentaje de (NaCl) en el ambiente de 3,5%, entre otros. Los resultados obtenidos permitieron obtener tasas de desgaste, así como la cuantificación de la incidencia del fenómeno erosivo. Dichas observaciones permitieron concluir y confirmar que deben los álabes de las turbinas en donde las partículas formen ángulos alrededor de 30° serán altamente afectados por la erosión.

Palabras clave: Turbinas Eólicas, efectos sinérgicos, efectos aditivos, cortante, deformación, corrosión, erosión.

Abstract

Wind turbines are important devices in the generation of clean energy in places where there are usable air currents. However, they are easily affected by the corrosion-erosion phenomenon given the environmental conditions, such as: the presence of particles and aggressive agents in the environment, as well as the humidity typical of the tropics.

In this work, two previously developed models of erosion and Corrosion were analyzed and adapted to the representative environmental conditions of at least two places localized in Colombia. La Guajira was taken like the most important given its aggressiveness. Based on the above, the following conditions were taken: the impact speed of 15m / s, particle size of 375 μ m, percentage of (NaCl) in the environment of 3.5%, among others. The results obtained allowed obtaining wear rates, as well as the quantification of the incidence of erosive phenomenon. Those observations confirmed that geometries where particles impact in angles around 30° will be highly affected by erosion.

Keywords: Wind turbines, synergistic effects, additive effects, cutting, deformation, corrosion, erosion.

Contenido

	<i>Pág.</i>
<i>Contenido</i>	<i>XI</i>
<i>Lista de figuras</i>	<i>XII</i>
<i>Lista de tablas</i>	<i>XIII</i>
<i>Lista de símbolos y abreviaturas</i>	<i>XIV</i>
<i>Introducción</i>	<i>17</i>
<i>Capítulo 1. Marco Teórico</i>	<i>19</i>
1.1. Fenómeno de Corrosión – Erosión.....	<i>19</i>
1.2. Modelos de erosión.....	<i>20</i>
1.3. Modelo de Corrosión.....	<i>26</i>
1.4. Modelo de corrosión-erosión.....	<i>27</i>
<i>Capítulo 2. Justificación del problema</i>	<i>29</i>
<i>Capítulo 3. Objetivos</i>	<i>31</i>
<i>Capítulo 4. Metodología</i>	<i>32</i>
<i>Capítulo 5. Resultados</i>	<i>33</i>
5.1. Supuestos y consideraciones.....	<i>33</i>
5.2. Simulación y resultados.....	<i>35</i>
<i>Capítulo 6. Conclusiones</i>	<i>42</i>
6.1. Conclusiones.....	<i>42</i>
<i>Anexo A. Modelo de corrosión-erosión para matlab</i>	<i>43</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>47</i>

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1. Corrosión de un acero en una solución acida. Tomado de Corrosion and Surface Chemistry</i>	
[1].....	18
<i>Figura 1.1: Pérdida de material con el tiempo</i>	
[1].....	20
<i>Figura 1.2: Comportamiento erosivo de material dúctil y frágil</i>	
[5].....	23
<i>Figura 1.3: Fenómenos de desgaste en materiales dúctiles. W_d, es desgaste por alta repetitividad de impacto. W_c, es desgaste por el cortante. W_t es el desgaste total del material.</i>	
[3].....	24
<i>Figura 1.4: Acción de deformación y cortante del modelo de Oka</i>	
[7].....	25
<i>Figura 1.5: Resultados de tasa de penetración</i>	
[11].....	26
<i>Figura 5.1: Curva de polarización potenciodinámica del acero 1020</i>	
[13].....	34
<i>Figura 5. 2: Velocidad de impacto. a) 15 m/s. b) 10 m/s. c) 5 m/s.....</i>	37
<i>Figura 5. 3: Influencia de la corrosión y la erosión en el desgaste total. a) 15 m/s. b) 10 m/s. c) 5 m/s.....</i>	39
<i>Figura 5. 4: Comportamiento del desgaste a 30°.....</i>	40
<i>Figura 5. 5: Desgaste con el cambio de la masa de impacto a una velocidad de 15 m/s. a) 1.2 Kg/día. b) 10 Kg/día.....</i>	41

Lista de tablas

	<i>Pág.</i>
<i>Supuestos.....</i>	<i>Tabla 5. 1:</i>
	<i>33</i>

Lista de símbolos y abreviaturas

Latinos

ΔE	Cambio de potencial
A	Área expuesta del ánodo
ba	constante anódica de taffel
bc	Constante catódica de taffel
Cd	Coefficiente de arrastre
CR	Tasa de corrosión
d	Densidad
E	Módulo de young
$E(\alpha)$	Daño por erosión
E90	Dependencia del ángulo de impacto a una erosión normalizada
EW	Peso equivalente del ánodo
F	Constante de Faraday
$g(\alpha)$	Tasa de erosión a diferentes ángulos
Hv	Dureza del material
Icorr	Densidad de corriente de corrosión
K	Factor de forma
K1	Velocidad necesaria para producir erosión
k1, k3	Constantes dependientes de las propiedades de las partículas
k2	Constante dependiente de las propiedades de la partícula y la dureza del target
K2	Velocidad mínima para desgaste por deformación
Kc	Daño por corrosión
Ke	Daño por erosión
Kec	Daño por corrosión-erosión
m	Masa de material particulado
n	Constante dependiente de ϵ y δ
n1, n2	Constante dependiente de la dureza del target y la forma de la partícula
p	Constante plástica de tensión de flujo
q	Coefficiente de Poisson
Q	Volumen de material removido (Ian finnie)
r	Radio de la partícula
Rp	Resistencia óhmica

W	Erosión total
y	Fluencia
Δi	Cambio de corriente

Griegos

α	Ángulo de impacto
ψ	Profundidad de corte
ε	Energía necesaria para remover volumen por deformación
δ	Energía necesaria para remover volumen por cortante

Subíndices

p	Partícula
a	Aire
t	Target/objetivo
d	Deformación
c	Cortante
o	Máximo del cortante

Introducción

Las turbinas eólicas son sistemas de energía limpia que se instalan en lugares donde las velocidades de viento son altas y constantes, de tal manera que se puede crear alternativas como parques eólicos para generar, almacenar y distribuir energía en diferentes sitios y comunidades. Esta tecnología, tan común en otros países, ha sido analizada en términos energéticos, de productividad y economía. Así mismo, los aerogeneradores han sido evaluados en diferentes ambientes, dado que la respuesta de estos dispositivos y su durabilidad está supeditada al lugar donde se encuentran instalados. De acuerdo con lo anterior, es pertinente un análisis para el caso colombiano, específicamente en lugares tales como el Cabo de la Vela donde se producen altas velocidades de viento con una alta densidad de material particulado. En esta zona del país, La Guajira, se encuentran unos de los parques eólicos más grandes del país, donde grandes turbinas eólicas de eje horizontal han sido instaladas. Sin embargo, dado su tamaño y costo, estos dispositivos no son la solución más sencilla para soluciones de abastecimiento energético en regiones apartadas del país. En este caso, la solución más ajustada serían turbinas de eje vertical cuyos diseños son mucho más pequeños y pueden ser instalados en viviendas individuales o formar granjas de generación.

A pesar de las diferencias entre las turbinas eólicas de eje vertical y horizontal, los mecanismos de deterioro pueden ser equivalentes en la medida en que ambos están expuestos de igual manera a las condiciones ambientales, tales como la humedad, las partículas en el ambiente, la velocidad del viento, entre otras.

Lo anterior, puede promover la aparición de fenómenos erosivos o de corrosión-erosión. Este último proceso de deterioro puede ser generado por condiciones totalmente diferentes pero que se pueden presentar en sitios y/o lugares característicos de un ambiente al mismo tiempo. Mientras que la erosión es un desgaste mecánico que se produce en el material base, que ahora llamaremos target u objetivo, debido al impacto de partículas de materiales de alta dureza, tales como alúmina, sílice o arena, entre otros. Dicha acción genera una deformación parcial en el objetivo que puede conducir a la pérdida de material. Por otro lado, la corrosión se debe a la interacción química o electroquímica

entre materiales en presencia de un medio agresivo. Para que exista la corrosión deben presentarse 3 elementos fundamentales, el primero es un ánodo, el segundo un cátodo y el tercero un electrolito. El ánodo es el material que va a tender a desgastarse ya que sufre el proceso de oxidación o disolución de material, lo que produce que los electrones liberados por el ánodo se unan al agente oxidante en una reacción de reducción que en la mayoría de los casos es el electrolito, como lo ilustra la *Figura 1*.

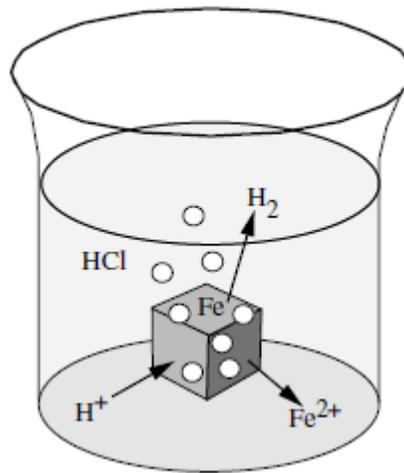


Figura 1. Corrosión de un acero en una solución ácida. Tomado de Corrosion and Surface Chemistry [1]

Este trabajo se centra en dilucidar los factores y parámetros ambientales de mayor incidencia en el deterioro bajo condiciones de corrosión erosión que pueden afectar aerogeneradores tanto de eje vertical como horizontal. Así mismo, presenta la simulación de este fenómeno basados en modelos separados de erosión y corrosión tomados de la literatura que toman en cuenta parámetros mecánicos, químicos y electroquímicos.

Capítulo 1. Marco Teórico

1.1. Fenómeno de Corrosión – Erosión

La corrosión erosión es el resultado de la combinación de los efectos electroquímicos y mecánicos de desgaste, que producen la pérdida de material de un sustrato. El fenómeno mecánico o erosivo, se produce por el impacto repetitivo de partículas sobre una superficie que puede generar además de pérdida de material, cambios en las propiedades mecánicas de la superficie del metal. Este fenómeno es afectado por parámetros ambientales y del material expuesto al ambiente, tales como: [1]

- Tamaño de grano
- Velocidad de la partícula
- Angulo de impacto de la partícula
- Humedad del ambiente
- Porcentaje de Cloruro de Sodio (NaCl) en el ambiente
- Dureza del material
- Dureza de la partícula

La acción combinada de estas variables puede conducir a una deformación plástica en el material, lo que deriva en un daño permanente y afectaciones en sus propiedades mecánicas. En la *Figura 1.1* se muestra como un material pasivable va perdiendo su capa de protección y su material base va siendo removido debido a la alta repetitividad de impacto, teniendo en cuenta que dicha acción erosiva

puede impedir la formación de la capa pasiva de nuevo. [1] Esta remoción de material hace que la corrosión erosión sea un fenómeno que aumenta con el tiempo de exposición del material.

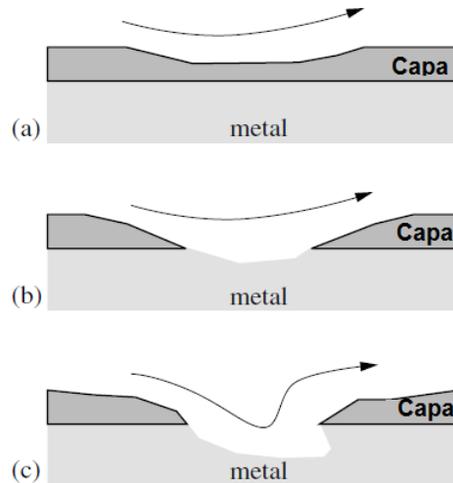


Figura 1.1: Pérdida de material con el tiempo [1]

Para lograr una comprensión completa del fenómeno planteado en este trabajo se estudiaron de forma separada los dos tipos de degradación involucrados, la erosión y la corrosión.

1.2. Modelos de erosión

El fenómeno de erosión ha sido ampliamente estudiado, tanto así que los modelos matemáticos que más se adaptaban a los resultados puestos en práctica, se vienen dando desde los años 30 y han ido perfeccionando poco a poco. Ian Finnie [2] fue uno de los pioneros para el desarrollo de los modelos de erosión dando pautas sobre los parámetros de mayor influencia durante la acción del fenómeno. De acuerdo con sus aportes, se pueden resaltar algunos parámetros asociados a la partícula, tales como: la forma, tamaño, dureza, densidad y resistencia; y relativos al flujo: la velocidad y el ángulo de impacto. Así mismo, otro de sus hallazgos desde observaciones experimentales, fue la relación entre la forma de la partícula y la pérdida de volumen, entre más redonda sea la partícula menor habrá desgaste volumétrico del material [2].

Finnie a partir de sus condiciones iniciales estableció que la pérdida de volumen aumentaría siempre con el aumento de la masa y la velocidad del sistema, pero a medida que la forma de la partícula tendía a ser más redonda el desprendimiento de material disminuía, y como los experimentos que realizó fueron con aire, relacionó la densidad del aire y de la partícula, su tamaño y el coeficiente de

arrastre en una constante de tal manera que con la inclusión de estos parámetros se puede aumentar o disminuir la erosión del sistema, esto se puede observar en la Ecuación 1.1, 1.2 y 1.3. [2]

$$Q = \frac{mV^2}{p\phi K} (\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha) \quad \tan \alpha < \frac{K}{6} \quad (1.1)$$

$$Q = \frac{mV^2}{p\phi K} \left(\frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad \tan \alpha > \frac{K}{6} \quad (1.2)$$

$$K = \frac{3C_d \rho_a}{8r \rho_p} \quad (1.3)$$

J.G.A. Bitter a su vez, introdujo un concepto importante, dividir el fenómeno erosivo en 2, uno atribuido al esfuerzo de deformación y el otro al cortante. El primero se debe al impacto repetitivo de las partículas sobre el sustrato lo que generará una deformación del material mientras que el segundo mantiene el concepto de la componente horizontal de la velocidad de impacto, lo que causa el arranque de material en el sistema que, dependiendo del ángulo de impacto aumenta o disminuye [3-4].

De tal manera, J.G.A. Bitter basó sus principios de remoción de material en las ecuaciones de Finnie, pero añadió propiedades intrínsecas del material y de la partícula tales como el módulo de Young y el módulo de Poisson, además de la fluencia y la densidad. Parte complicada de la aplicación de este modelo es la forma en la que se debe calcular la energía para remover una unidad de material, ya sea por cortante o por la deformación, sin embargo, da indicios sobre un desarrollo y base para el desarrollo de modelos más realistas ajustados con los resultados experimentales, esto se puede observar en las ecuaciones 1.4, 1.7 y 1.8. [3-4]

- Deformación

$$W_d = \frac{M*(V \sin \alpha - K)^2}{2\epsilon} \quad (1.4)$$

$$K = \frac{\pi^2 * y^{\frac{5}{2}}}{2 * (10)^{0.5}} * \left(\frac{1}{d} \right)^{0.5} * \left(\frac{1 - q_1^2}{E_1} + \frac{1 - q_2^2}{E_2} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$K = \left(\frac{2y}{3C} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (1.6)$$

$$C = \frac{0,288}{y} \left(\frac{d}{y} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.7)$$

- Cortante

CASO 1

$$W_{c1} = \frac{2mC(V\sin\alpha - K1)^2}{(V\sin\alpha)^{0,5}} * \left(V\cos\alpha - \frac{C(V\sin\alpha - K1)^2}{(V\sin\alpha)^{0,5}} \right) \vartheta \quad (1.8)$$

CASO 2

$$W_{c2} = \frac{0,5m \left(V^2 \cos^2 \alpha - K1(V\sin\alpha - K1)^{\frac{3}{2}} \right)}{\vartheta} \quad (1.9)$$

$$K1 = 0,82y^2 \left(\frac{y}{d} \right)^{\frac{1}{4}} * \left(\frac{1-qp^2}{Ep} + \frac{1-qt^2}{Et} \right)^2 \quad (1.10)$$

Este concepto de JGA Bitter aplica solamente para materiales dúctiles ya que los materiales frágiles no presentan una pérdida de material por cortante. Por el contrario, el deterioro se debe a la alta repetitividad del impacto de las partículas. Es por ello por lo que, en la representación del ángulo de impacto respecto al tipo de material, ilustrado en la *Figura 1.2*, se puede observar la respuesta diferenciada a un ambiente erosivo de ambos tipos de material. [3-4-5]

Así mismo, los autores definieron que la cantidad de pérdida de material que se producirá será la sumatoria de los 2 tipos de desgaste en que se dividió el fenómeno erosivo, deformación y cortante,

que permitió confirmar el comportamiento mencionado anteriormente para materiales frágiles y dúctiles mediante ensayos de laboratorio, tal como se observa en la *Figura 1.3* [3-4-5].

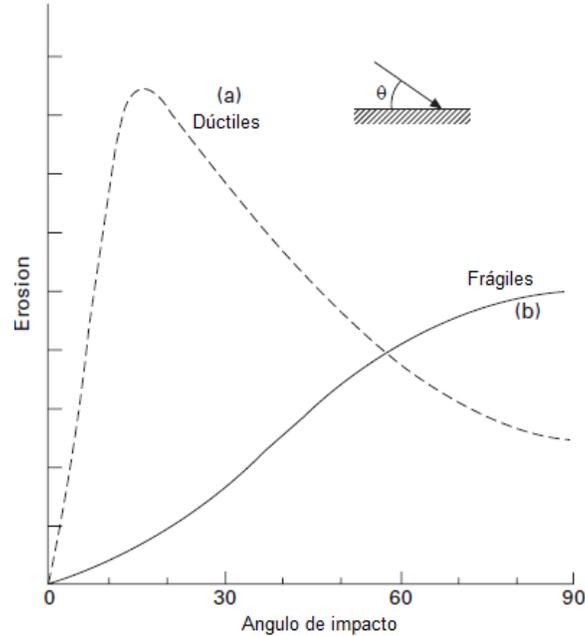


Figura 1.2: Comportamiento erosivo de material dúctil y frágil [5]

Basados en estos resultados, JH Nielson y A. Gilchrist [6] partieron del modelo de JGA Bitter y acotaron un nuevo modelo, en el que categorizaron la importancia e influencia de las variables mencionadas en los resultados experimentales. Así mismo, avanzaron en la determinación de los factores asociados a las acciones de deformación y de cortante. Lo anterior, contribuyó a la utilización del modelo y la comprensión de los resultados en función de la velocidad, la masa y el ángulo de ataque [6].

Nielson consolidó una manera semi-teórica de determinar la energía necesaria para remover material según el modelo de desgaste que se pueda presentar. Con ello, el modelo ya era aplicable pero solamente si se realizaban las pruebas experimentales previas a la modelación.

$$\bullet \quad W = \frac{mV^2 \cos^2 \alpha \sin^2 n\alpha}{2\delta} + \frac{m(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad \alpha < \alpha_0 \quad (1.11)$$

$$\bullet \quad W = \frac{mV^2 \cos^2 \alpha}{2\delta} + \frac{m(V \sin \alpha - K)^2}{2\varepsilon} \quad \alpha > \alpha_0 \quad (1.12)$$

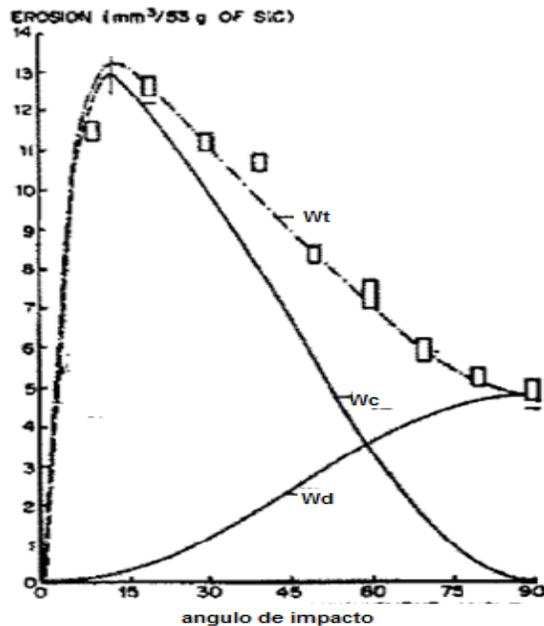


Figura 1.3: Fenómenos de desgaste en materiales dúctiles. W_d , es desgaste por alta repetitividad de impacto. W_c , es desgaste por el cortante. W_t es el desgaste total del material. [3]

Los 3 modelos anteriormente mencionados se aplican sobre la base de resultados experimentales que confirme los resultados y generen cuantificaciones tales como el cálculo de la erosión total. Ya que existen variables como el coeficiente de arrastre, la energía necesaria para remover una unidad de material por cortante y por deformación, la profundidad de indentación de la partícula dentro del sustrato, entre otros; que son complejos de calcular debido a que son propiedades instantáneas del impacto de la partícula en el sustrato. En consecuencia, el desfase que se puede producir en simulaciones puede exceder dramáticamente.

Estos modelos ilustran la importancia de las propiedades del sustrato (material que será impactado) y el material erosivo (Impactador), así como el hecho de que para que se produzca la deformación del material, la dureza del erosivo debe ser mayor que la del sustrato, si esto no se cumple, la energía será absorbida por el material erosivo y será el que sufrirá la pérdida de material, de tal manera que se puede fragmentar y disminuir el tamaño de grano. Así mismo, propiedades del material como los módulos de Young y Poisson, son importantes dado que están relacionados con la energía necesaria para lograr deformación en los materiales.

Y.I. Oka, et al., desarrollaron un modelo que compartía las mismas variables de flujo de los modelos anteriormente mencionados, pero desistía del uso de propiedades tales como el módulo de Young y Poisson de los materiales; en vez de estos, implementó el uso de la dureza del sustrato asumiendo siempre que se va a realizar la erosión con un material mucho más duro que el sustrato. Además, reconoció que existen 2 tipos de desgaste dentro del fenómeno, pero los abordó de tal manera que la erosión total fuese debido al efecto multiplicativo de la acción por cortante y la acción por deformación, esto se puede observar en la *Figura 1.4*. [7-8-9-10]

- $E(\alpha) = g(\alpha)E_{90}$ (1.13)

- $g(\alpha) = \text{sen}\alpha^{n1}(1 + Hv(1 - \text{sen}\alpha))^{n2}$ (1.14)

- $E_{90} = K(Hv)^{k1}(v)^{k2}D^{k3}$ (1.15)

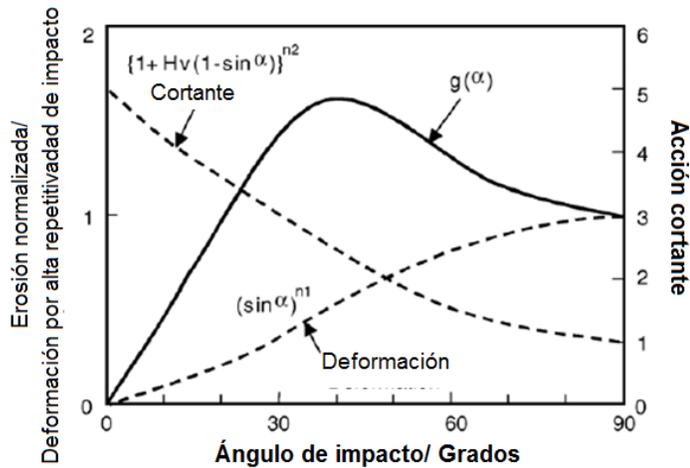


Figura 1.4: Acción de deformación y cortante del modelo de Oka [7]

Finalmente, G.C Pereira, et al. realizaron una validación de modelos modernos, de los cuales se excluye el modelo de Ian Finnie y el de JGA Bitter porque describen muy bien las variables que afectan el fenómeno, pero no hay concordancia entre los resultados calculados y los experimentales. De acuerdo con lo anterior, determinó, basado en los modelos de Oka, et al., así como de Nielson y Gilchrist. G.C, que la erosión se puede determinar como una tasa de penetración de la partícula en el sustrato, lo que involucra el flujo másico y la densidad del flujo. Con estas medidas y la comprobación de cada uno de los modelos, se definió que el modelo Oka era el que más se acercaba teóricamente a los resultados experimentales. En la *Figura 1.5* se pueden observar los resultados de simulación de erosión obtenidos por G.C. Pereira, et al. En donde se muestra cual fue el modelo

cuyos resultados eran más cercanos a los resultados experimentales teniendo en cuenta que el modelo se evaluaba según la tasa de penetración del material en el sustrato. [11]

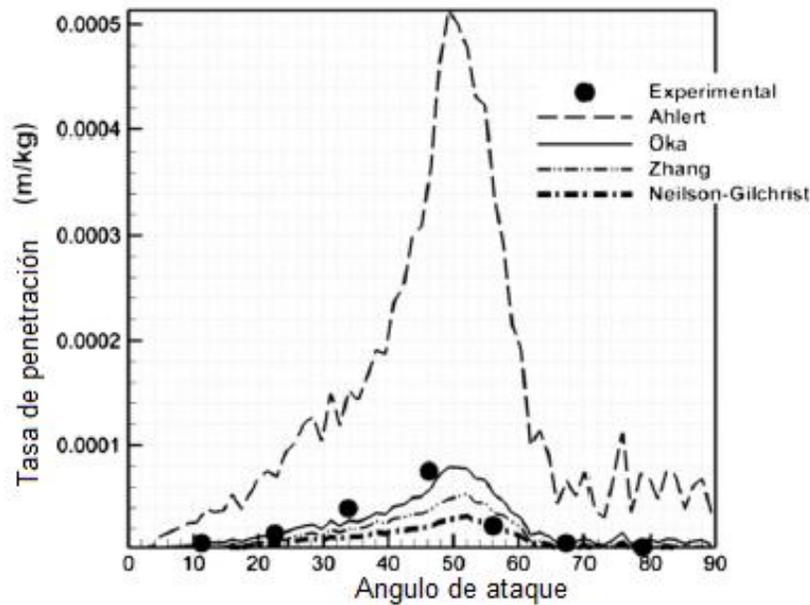


Figura 1.5: Resultados de tasa de penetración [11]

1.3. Modelo de Corrosión

Para determinar la tasa de corrosión, dada como la pérdida de material debido a la acción química del medio circundante, es necesario considerar la ecuación de Stern-Geary. En ella se define una ecuación que permite determinar la densidad de corriente de corrosión del sistema a partir de las curvas de polarización, teniendo en cuenta la resistencia óhmica que se presenta en cada uno de los casos de medición. [1-12] Esta aproximación permite a su vez calcular parámetros cinéticos de la evolución de las reacciones disolución del material mediante las pendientes y coeficientes de Tafel.

$$\bullet \quad R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (1.16)$$

$$\bullet \quad I_{corr} = \frac{b_c b_a}{2.3(b_c + b_a) \cdot R_p} \quad (1.17)$$

$$\bullet \quad CR = \frac{I_{corr}(EW)}{dFA} \quad (1.18)$$

1.4. Modelo de corrosión-erosión

El modelo base para el desarrollo de la simulación fue dado por M.M Stack, et al. Ya que a pesar de que se difiere en el modelo de erosión escogido, establece que por facilidad de cálculo es necesario desprestigiar los efectos sinérgicos que la corrosión ejerce sobre la erosión y viceversa. De tal manera que la pérdida total de material será la adición de los fenómenos erosivos y corrosivos, ya que los efectos aditivos son los que se pueden medir de manera individual, además, simplifica el efecto del cálculo evitando variables sinérgicas que no se pueden medir.[5]

$$K_{ec} = K_e + K_c \quad (1.19)$$

La ecuación 1.19 muestra la relación entre la tasa de corrosión-erosión (K_{ec}) como la suma de los efectos aditivos, tanto de erosión (K_e) como de corrosión (K_c) dados en unidades de desgaste. K_e está basado en 2 modelos, el primer modelo es el de impacto oblicuo establecido por Finnie [2] que no incluye formalmente propiedades específicas del material particulado que esta impactando. El segundo modelo está basado en el impacto normal de Sundararajan y Shewmon [5] bajo flujos que suponen temperaturas, en donde relacionan propiedades como el calor específico del target y la temperatura ambiente de impacto. Sin embargo, no incluye propiedades tales como: la dureza de la partícula para el impacto en el target. Por otra parte, K_c está basado en el modelo de corrosión de Stean-Geary [5-12], descrito previamente.

En conclusión, este modelo no fue considerado dado que los efectos aditivos de cada fenómeno no relacionan los parámetros que modifican o intervienen de manera más relevante en procesos corrosivos y erosivos.

Capítulo 2. Justificación del problema

Aunque a lo largo del país hay diversas fuentes de energía, existen zonas no interconectadas (ZNI) al sistema eléctrico nacional, cerca de 1710 poblados (corregimientos, localidades pequeñas, caseríos, municipios), donde habitan poco más de 1'472.100 personas, no cuentan con el servicio de energía eléctrica continua. El consumo promedio por familia (4 integrantes) puede llegar a 5.75KW [14-15-16].

La accidentada topografía colombiana si bien brinda retos en cuestión de infraestructura, presenta zonas en las que el recurso energético renovable tiene un alto potencial de aprovechamiento. En especial, la energía eólica ha estado en el centro de la discusión y reglamentación en los últimos meses, como una fuente alternativa y limpia para la producción de energía eléctrica, y por tanto como un impulso para el desarrollo de áreas rurales y semi-rurales [15-16].

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) son dispositivos diseñados para la producción de energía eléctrica, puesto que transforman la energía cinética del viento en corriente eléctrica, dicha corriente es de tipo continua (DC). Una vez obtenida la DC se debe transformar o convertir a corriente alterna (AC), lo que permitirá transportarla y utilizarla. [17]

En general, las turbinas en servicio se encuentran sometidas a fenómenos ambientales tales como la radiación solar, el viento, el impacto de las partículas que se encuentran en el aire, la humedad relativa, la lluvia y la temperatura. Todo ello, conduce a la aparición de fenómenos de degradación y deterioro, siendo la corrosión-erosión el fenómeno más destacado.

Este mecanismo de degradación es el resultado de una reacción electroquímica combinada con la pérdida de material por el desgaste mecánico, debido al choque de partículas sólidas o de un fluido con el material base.

De acuerdo con lo anterior, es importante como paso previo a la fabricación de turbinas, conocer los puntos críticos del diseño planteado, teniendo en cuenta las condiciones ambientales del lugar donde se utilizarán las turbinas y la degradación que allí sufrirán. Para entender los efectos de dichos parámetros es de vital importancia la simulación de los fenómenos que pueden afectar: el diseño del

dispositivo y los materiales propuestos para su construcción. De tal manera que, se puedan sugerir cambios que ayuden a prolongar la vida útil de la turbina en servicio.

La simulación es una técnica numérica usada para mostrar cambios internos o externos de un sistema. Estos cambios se presentan debido a las fluctuaciones de las variables utilizadas en el proceso. La simulación relaciona la matemática con la lógica del fenómeno, las cuales son necesarias para describir los cambios de los sistemas durante ciertos periodos de tiempo.

En este trabajo se buscará entender las variables más importantes que intervienen en procesos de corrosión-erosión. Así mismo, con base en la literatura plantear un modelo numérico que integre dichos parámetros que permita tener calcular tasas de desgaste y degradación.

Capítulo 3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Identificar los parámetros más relevantes en procesos de corrosión erosión y utilizarlos en la simulación del comportamiento y la degradación de los materiales usados en un perfil de una turbina eólica de eje vertical, sometido a condiciones ambientales agresivas como aquellas reportadas en La Guajira.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar los modelos mecanísticos y sus variables existentes en la literatura, aplicables al estudio de degradación por corrosión erosión de un perfil de una turbina eólica.
- Determinar las variables de mayor incidencia para ser utilizadas como base en la modelación de los fenómenos erosivos y corrosivos.
- Definir el modelo matemático aplicable para la simulación de fenómenos de corrosión erosión en el contexto colombiano teniendo en cuenta parámetros y condiciones de servicio
- Simular el desgaste bajo diferentes condiciones de degradación de corrosión erosión de un alabe de una turbina eólica de eje vertical en 2 escenarios colombianos.

Capítulo 4. Metodología

- 4.1 Búsqueda bibliográfica de modelos de corrosión-erosión que han sido aplicados en el deterioro de piezas expuestas a esta condición.
- 4.2 Identificación de las variables y parámetros más relevantes en desgaste erosivo y corrosivo que deben ser tenidos en cuenta en las modelaciones a proponer.
- 4.3 Selección de los modelos de corrosión-erosión existentes, tomando como base aquellos cuyos supuestos puedan ser adaptados al contexto nacional y al dispositivo seleccionado, para su posterior análisis.
- 4.4 Definir el rango de las variables para la simulación de acuerdo con dos puntos geográficos diferentes.
- 4.5 Crear el código de simulación de corrosión-erosión que contemple todas las variables establecidas previamente y probarlo.

Capítulo 5. Resultados

5.1. Supuestos y consideraciones

De acuerdo con ello, dada la extensión y disponibilidad de datos, se escogió un acero AISI 1020 desnudo. Aunque en condiciones reales se utilizan sistemas recubiertos, se consideró un sistema de metal expuesto buscando simplificar el sistema en sus primeras etapas de desarrollo. Así mismo, este material fue identificado como el material base con el que están hechas las turbinas eólicas comerciales que están siendo ensayadas de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito, a pesar de que en su mayoría las VAWT son hechas en aluminio, por su densidad y pasividad.

De acuerdo con lo anterior, en la tabla 5.1 se relacionan las consideraciones y supuestos para la realizar la simulación del modelo de corrosión-erosión.

Propiedades del target	
Material	Dúctil
Módulo de elasticidad	343 Mpa
Módulo de Poisson	0.3
Dureza (Gpa)	1.236
Densidad (g/cm ³)	7.87
Área expuesta (cm ²)	1
Propiedades de la arena	
Dureza (Gpa)	30
Tamaño (mm)	0,375
Factor de forma	0,19
Propiedades del flujo y del fluido	
Velocidad máxima (m/s)	15
Porcentaje de Cloruro de Sodio (NaCl) en el ambiente	3

Tabla 5. 1: Supuestos

De acuerdo con lo mostrado en la tabla se considera también lo siguiente:

5.1.1 Ambiente de “exposición constante”, es decir, que el fenómeno ocurre de forma continua.

- 5.1.2 De acuerdo con estimaciones que se han hecho para intentar simular el desgaste, se encontró que la velocidad máxima que el viento alcanza en el Cabo de la vela es de 15 m/s, además, se asume que la partícula lleva la misma velocidad del viento. [18]
- 5.1.3 El tamaño de partícula seleccionado fue de 375 μm , dado que es un tamaño promedio de aquellos usados experimentalmente por Oka [10] y corresponden con valores ambientales.
- 5.1.4 El parámetro de forma, k_3 es 0,19 que corresponde a una forma casi esférica. [8-9-10]
- 5.1.5 El área corroída y erosionada cambia sus dimensiones en cualquier punto de forma homogénea. [1]

Así mismo, los parámetros de corrosión usados para el AISI 1020 fueron obtenidos por A. de Jesus Motheo and L. D. Bisanha, estos resultados electroquímicos se pueden observar en la *Figura 5.1.* [13] Donde con una aproximación visual de las pendientes de taffel, se podría calcular que la densidad de corriente de corrosión es aproximadamente $10^{-5} \frac{A}{\text{cm}^2}$ correspondiendo con un potencial de -0.545V.

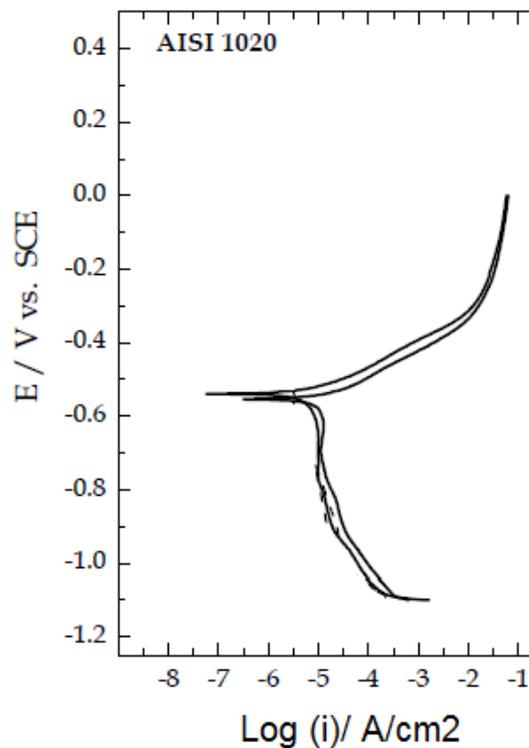


Figura 5.1: Curva de polarización potenciodinámica del acero 1020 [13]

Dado que el modelo de erosión que se aplicó fue el de Oka [7-8] fue necesario determinar el valor de las variables n_1 , n_2 , k_1 , k_2 . Para empezar, n_1 y n_2 son constantes que ayudan a determinar cómo puede ser el comportamiento del desgaste, esto en función de la dureza del material. Para el cálculo de estas constantes se usaron parámetros experimentales calculados por Oka para la arena, y al final se pudo relacionar n_1 , n_2 en 2 ecuaciones en función solamente de la dureza, estas ecuaciones aplicadas para un AISI 1020 resultaron siendo las siguientes:

$$n_1 = 0.71(Hv)^{0.14} \dots\dots\dots (5.1.1)$$

$$n_2 = 2.8(Hv)^{-1} \dots\dots\dots (5.1.2)$$

Con los factores n determinados por las propiedades de la partícula y el target, se prosiguió a los factores k_1 y k_2 . Cada uno de ellos depende de la dureza y de la partícula también, pero en lo que respecta a k_2 , se mantuvo en un margen de cambio muy bajo, según la ecuación que se estimó y con la cual se obtuvo el valor de k_2 para el AISI 1020. La expresión utilizada fue la siguiente:

$$k_2 = -0.0333(Hv) + 0.8667 \dots\dots\dots (5.1.3)$$

Finalmente, el factor k_1 se tomó directamente de los resultados obtenidos por Oka [7-8] ya que experimentó con partículas de arena y con estas mismas se realizó la simulación. Dado que los valores tomados teóricamente diferían en un 5% del tamaño de grano de las partículas experimentales, “ k_1 ” tiene un valor adimensional de -0.05

5.2. Simulación y resultados

De acuerdo con la revisión bibliográfica, los modelos que se identificaron como relevantes y que relacionan las variables más importantes en términos de erosión y corrosión fueron aquellos propuestos por Oka [7-8] y Stearn-Geary [1-12], respectivamente. Estos modelos se describen en el Capítulo 1 y se rigen con las siguientes ecuaciones de desgaste, teniendo en cuenta que Oka [7-8] dividió la erosión en un fenómeno cortante y otro de deformación, donde $E(\alpha)$ es la erosión total, $g(\alpha)$ es la erosión que se produce a cualquier ángulo incluyendo deformación y cortante, por último E_{90} describe el comportamiento siempre existente de la erosión cuando el ángulo de impacto es 90° . Mientras que Stear-Geary [12] siempre definieron que la tasa de corrosión iba a depender de cuál era el material que estaba expuesto y allí afectaba su peso molecular y le número de electrones que

estaba dispuesto a ceder (EW), mientras que la corriente de corrosión era la causante de la aceleración d

el proceso, porque es un proceso electroquímico, además, es importante tener en cuenta la densidad del material (d) y la constante de Faraday (F) por la cantidad de carga eléctrica que se maneja en el sistema.

$$E(\alpha) = g(\alpha)E_{90}$$

$$CR = \frac{I_{corr}(EW)}{dFA}$$

Para su aplicación, se consideraron en este primer modelo solamente los fenómenos aditivos de ambos, que servirán de base para otras simulaciones y/o modelos que incluyan el efecto de la erosión en la corrosión y la corrosión en la erosión, que actualmente son de difícil cuantificación [1-5-11-12].

Para escalar el análisis, de cada simulación se escogieron los resultados obtenidos cada 10°, además, es importante mencionar que la tasa de corrosión se hizo constante porque las condiciones ambientales del lugar son en general agresivas, así que se considera la situación más crítica para simplificar los cálculos estableciéndola constante, dándole así mayor relevancia a los efectos erosivos. Este supuesto se hizo entorno a las condiciones según la humedad y la salinidad del lugar. Se supuso entonces que la tasa de disolución siempre es 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, basados en los trabajos de A. de Jesús Motheo and L. D. Bisanha [13].

De acuerdo con la tasa de disolución se determinó que la pérdida por factores asociados al desgaste corrosivo para el sistema planteado es de $11,6 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{año}$. Así mismo, se espera que impacte 1,2 Kg/día de material particulado sobre el target, esta cantidad de material particulado es estimada gracias los experimentos realizados por Y. Zao et al, quién realizó un diseño e implementación de una máquina de ensayos para corrosión-erosión y estimó que la masa impactada en ambientes de alto material particulado podría variar de 0,3 a 0,8 g/min. [20]

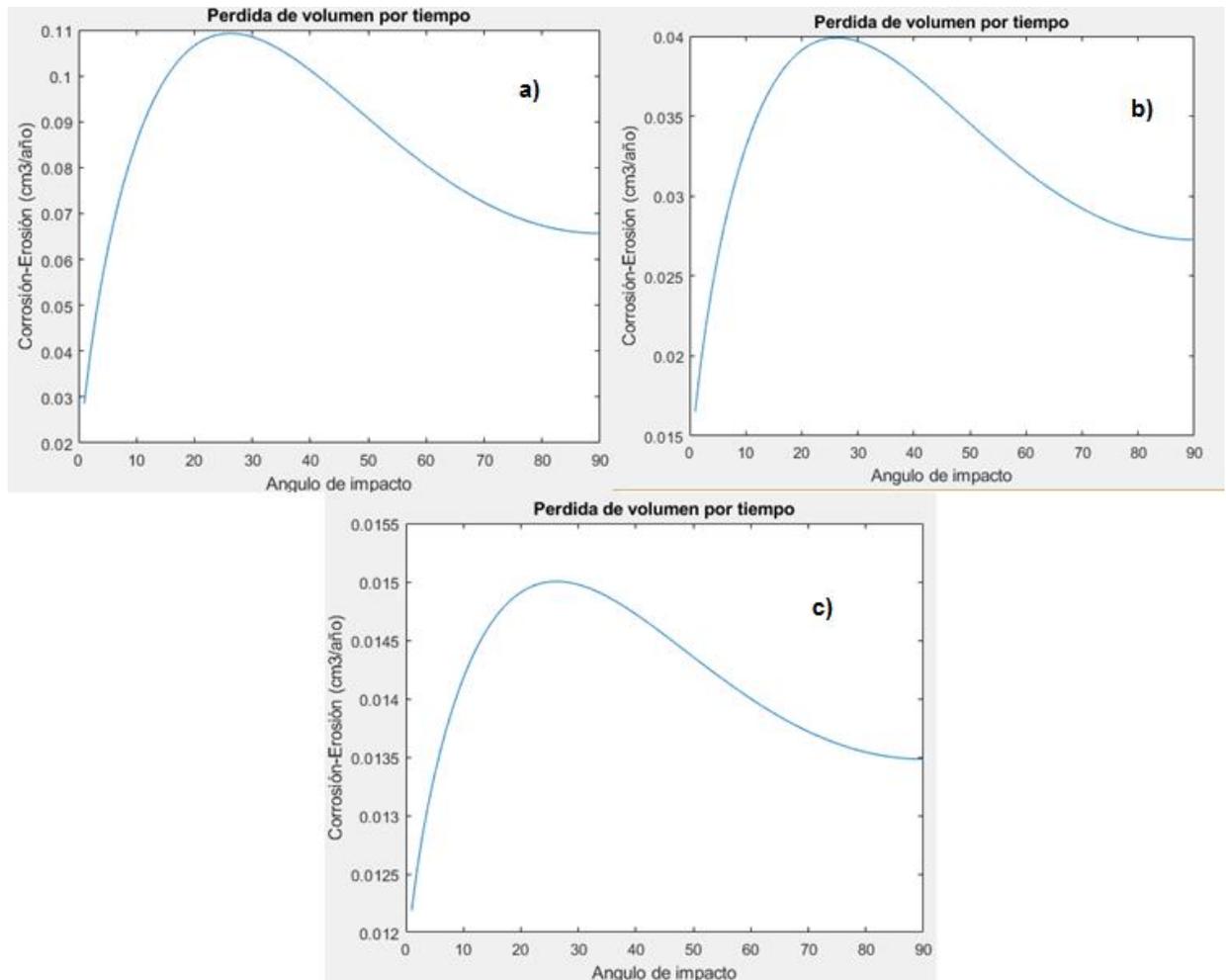


Figura 5. 2: Velocidad de impacto. a) 15 m/s. b) 10 m/s. c) 5 m/s

La interacción simultánea de las variables mecánicas y las constantes electroquímicas de ambos modelos permitió obtener gráficas del desgaste total en función del ángulo de impacto, para 3 valores diferentes de velocidad de impacto: 15 m/s, 10 m/s y 5 m/s. Así, el valor de 15 m/s puede simular un ambiente agresivo con alta velocidad como el de La Guajira, mientras que, el de 5 m/s puede simular un ambiente agresivo de baja velocidad (ya sea por barreras arquitectónicas o por accidentes geográficos) tales como las zonas industriales dentro de la ciudad de Bogotá.

Como se observa en la *Figura 5. 2*, al inicio de cada gráfica la pérdida de material es baja porque el ángulo de impacto es muy pequeño. En este rango, el incremento de metal desprendido se debe a la energía que lleva la partícula al momento del impacto. Sin embargo, al no ser suficiente para arrancar

el material al momento del roce, probablemente genere rayaduras. Posteriormente, al acercarse a la zona de ángulos críticos para materiales dúctiles se muestra un comportamiento con una pendiente mayor y cuyo máximo se produce a 30° grados. Lo anterior, coincide con lo reportado experimentalmente en la literatura [19]. Posteriormente, el sistema sufre una disminución a medida que se incrementa el ángulo dado que, las partículas van a generar un esfuerzo que produce deformación de la superficie más que una acción cortante. En el punto en el que el ángulo de impacto alcanza 90° se pueden generar incrustaciones de arena en el target y así, ir aumentando la deformación y pérdida de material por las puntas de alta energía que quedan allí.

Comparando la *Figura 5. 2* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con la *Figura 5. 2b* se puede observar que hay una disminución importante en el desgaste, así como para el ángulo de 5 m/s de la *Figura 5. 2c*. En este último caso se tuvo un decrecimiento de desgaste aún más drástico que en los dos casos anteriores. Los valores de desgaste máximo total para 15 m/s, 10 m/s y 5 m/s son de $108,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{año}$, $39,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{año}$ y $15 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{año}$, lo que es una disminución de dos órdenes de magnitud, estos valores no son comparables ya que no se encontró en la literatura análisis para este material. Sin embargo, hay estudios realizados a aceros inoxidable y duales de los cuales se puede tener una similitud de medidas en el desgaste químico y mecánico, esto se debe a que los valores dureza y módulo de elasticidad son similares [19-20]. El análisis de dicho decrecimiento muestra para 10m/s y 5 m/s, un decrecimiento aproximado del 75% y 90%, respectivamente en relación con el máximo desgaste obtenido para 15 m/s, lo que indica que el desgaste no tiene una función lineal respecto a la velocidad, así como la criticidad de los de ángulos de impacto.

Así mismo, el modelo mantiene la misma tendencia (comportamiento) para las condiciones de materiales dúctiles sin importar que tanto se disminuya o aumente la velocidad.

Las pérdidas de material se llevaron a gráficos de barras, *Figura 5. 3*, para entender la tendencia del régimen erosivo en el desgaste total en función del ángulo de impacto. Aunque la corrosión es un fenómeno activo y agresivo en todos los ambientes simulados, la mayor pérdida se tuvo por fenómenos erosivos para velocidades de impacto de 15m/s. Sin embargo, al disminuir la rapidez de movimiento de las partículas, el modelo muestra una disminución del desgaste total en donde los fenómenos corrosivos pueden tener un mayor protagonismo. Debe considerarse que si bien, a bajas velocidades se puede presentar ralladuras sobre la superficie, la película de electrolito en un ambiente húmedo permanece en la superficie y puede acelerar la corrosión en las zonas deformadas o rayadas de la superficie.

Si se aísla el punto más crítico del fenómeno (30°) puede observarse en la *Figura 5. 3*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a que para la condición de 15 m/s cerca del 90% del desgaste total ha sido debido a la erosión, mientras que para 10 m/s y 5 m/s (*Figura 5. 3*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**b y *Figura 5. 3*c) dicho fenómeno erosivo ha alcanzado solo el 71% y el 23%, respectivamente. Aunque en toda la simulación, 30° es el ángulo donde mayor pérdida de material se presenta.

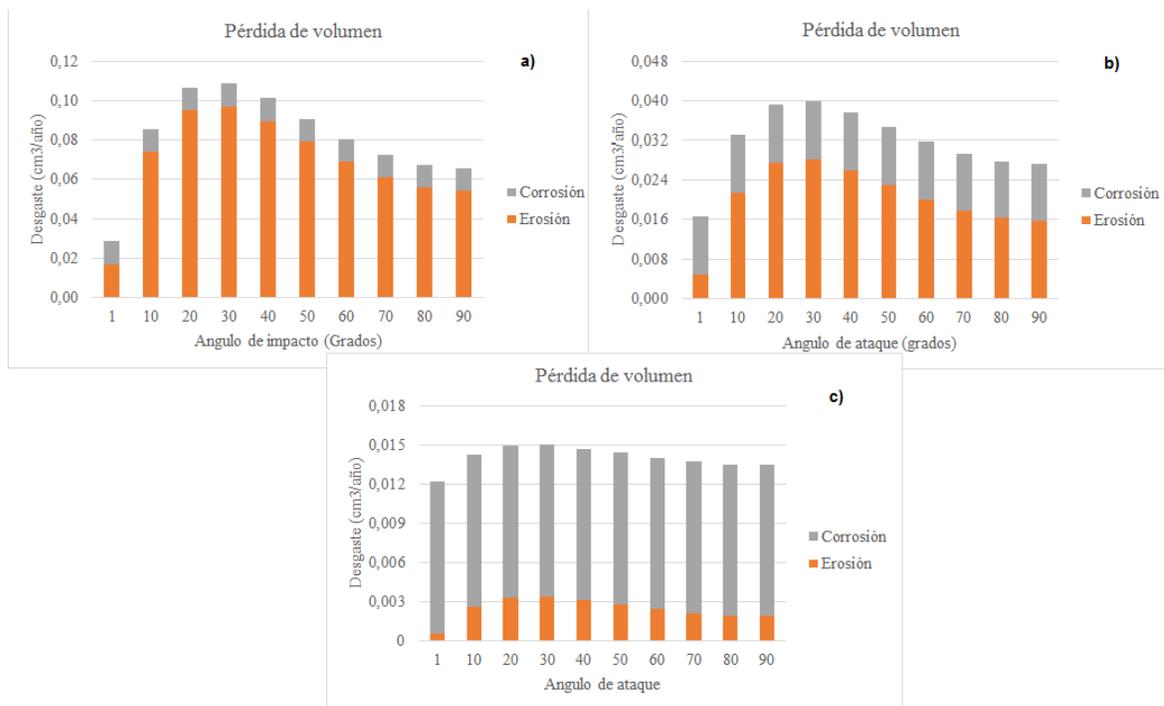


Figura 5. 3: Influencia de la corrosión y la erosión en el desgaste total. a) 15 m/s. b) 10 m/s. c) 5 m/s.

Así mismo, estas gráficas muestran como varía el desgaste erosivo y químico con relación al volumen total perdido. Bajo velocidades de impacto de partícula de 15m/s, el desgaste erosivo es aproximadamente del 96%, mientras que para 10m/s este tipo de desgaste es del 75%, mientras que para 5 m/s es menos del 28%. De acuerdo con lo anterior, para este último régimen el desgaste erosivo es muy bajo, así como el total que corresponde principalmente a procesos de corrosión. No a fenómenos aditivos dado que no fueron considerados en el modelo.

Dado que la literatura sugiere que para ambientes como el de La Guajira, la cantidad y velocidad del material particulado son altas, la erosión siempre será mayor que la corrosión. Lo que muestra la

Figura 5. 3c podría interpretarse como que debido a la “baja repetitividad de impacto” y la baja energía con la que la partícula impacta en el sustrato la deformación es mínima, y por ello solo se puede generar rayadura o arranque de material corroído. En consecuencia, estos resultados muestran que mediante la simulación puede establecerse un límite o umbral de velocidad para el desgaste en el modelo.

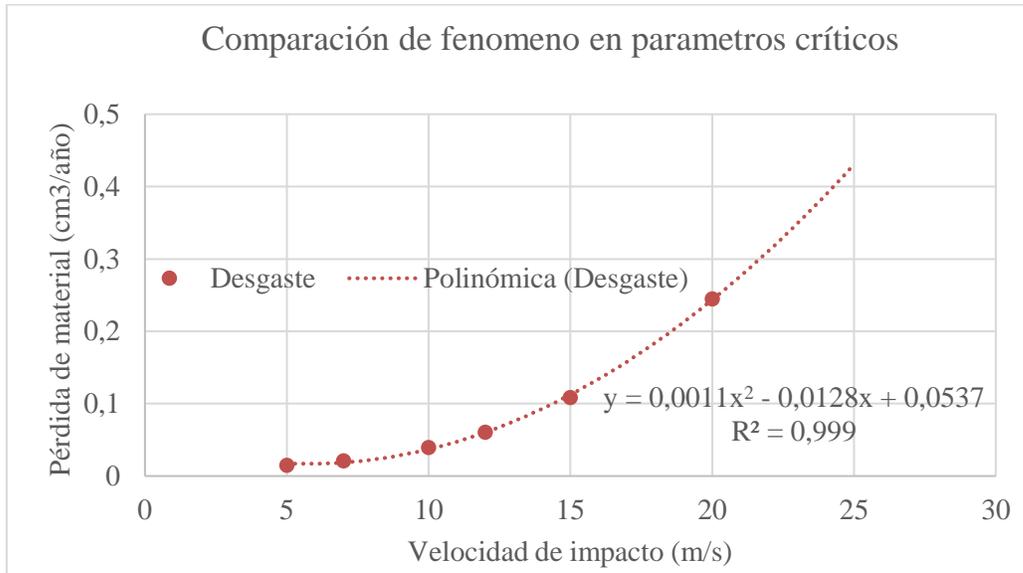


Figura 5. 4: Comportamiento del desgaste a 30°

En la Figura 5. 4 se estima el comportamiento del desgaste teniendo en cuenta el cambio de la velocidad solo en el ángulo más crítico del sistema y como se puede observar, la curva de tendencia polinómica de grado 2 fue la que más se ajustaba al comportamiento esperado. Esto es importante porque establece una tendencia de aumento del desgaste en función de la erosión, con esto se podría realizar un mapeo del fenómeno en función de la velocidad de impacto y potencial aplicado para el material simulado, y determinar si se encuentra si el material analizado se encuentra en un régimen dominado por la corrosión o la erosión, tal como lo realizó M.M. Stack [5]

Finalmente, para evaluar la estabilidad del modelo se hicieron gráficas variando la cantidad de material que impacta sobre la superficie. En la Figura 5. 5 se presenta la variación del desgaste total para una velocidad de impacto de 15 m/s con un aumento del material de impacto de 1.2 Kg/día a 10 Kg/día.

Dicho aumento generó una pérdida de material proporcional al aumento de la masa de material que impacta. El desgaste total pasó de 0.1 cm³/año a 0.8 cm³/año. Lo que confirma la estabilidad del

modelo manteniendo la relación directa entre la pérdida de volumen y la cantidad de material que impacta el target.

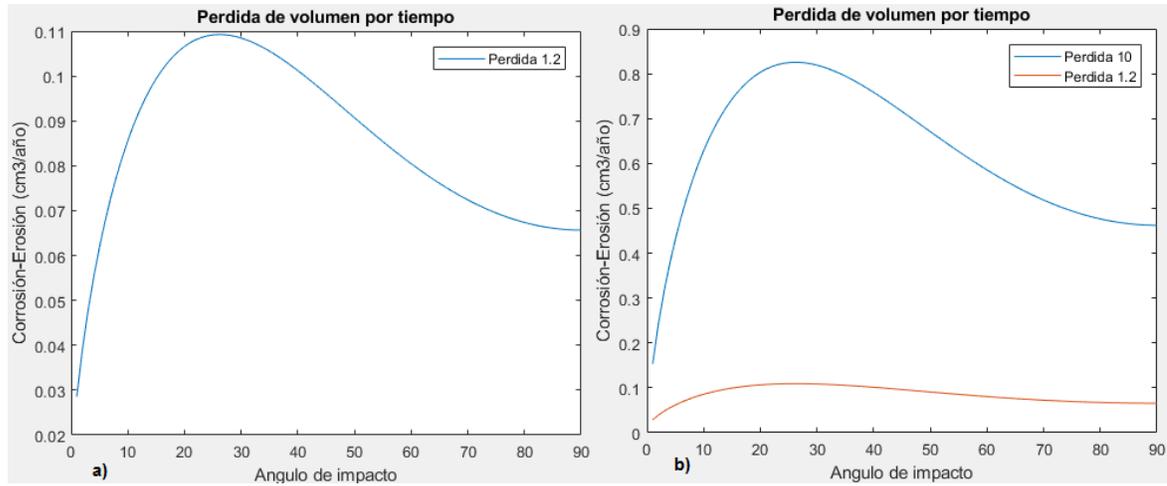


Figura 5. 5: Desgaste con el cambio de la masa de impacto a una velocidad de 15 m/s. a) 1.2 Kg/día. b) 10 Kg/día

Estos resultados indican que cualquier diseño de turbina eólica debe optimizar las áreas de exposición directa al viento, ya que con una mayor altura de instalación la velocidad del viento aumentará y, por ende, la erosión en el sistema será mayor que a nivel del suelo. El cambio en las áreas de exposición y las variaciones de ángulos disminuirá la probabilidad de impacto de la partícula en la turbina, lo que se ve reflejado en la una menor pérdida de material y del equipo en funcionamiento.

Este trabajo, relaciona modelos erosivos y corrosivos, así como los factores mecánicos, químicos y electroquímicos que los gobiernan. La revisión bibliográfica, la estimación de parámetros, la elaboración del código que estabiliza dos modelos de origen diferente, así como resultados que son coherentes con los fenómenos descritos teóricamente sientan las bases para desarrollar modelos mecanísticos de fenómenos de corrosión-erosión, en donde trabajos futuros puedan integrar parámetros que relacionen la influencia de la corrosión en la erosión y de la erosión en la corrosión. La validación y desarrollo posterior de este modelo debe estar respaldado por resultados experimentales.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

- **La integración de los modelos erosivos y corrosivos propuestos por Oka [7-8] y Stearn-Geary [1-12], permiten simular pérdidas de material y la variación respecto a parámetros importantes como la velocidad y ángulo de impacto de partículas suspendidas en el aire, además, se comprobó la relación directa entre el aumento del material particulado que impacta y el aumento del desgaste.**
- **Para altas velocidades de partícula, el modelo propuesto muestra sus máximas pérdidas de 28° a 30°, tal como se reporta en la literatura. Bajo este régimen el deterioro es mayormente erosivo, mientras que, para bajas velocidades, el poco material que se pierde es por los efectos corrosivos considerados.**
- **El modelo obtenido además de permitir el cálculo del desgaste de material con base en los fenómenos erosivos y corrosivos, sienta las bases para la futura integración de los efectos aditivos entre ambos fenómenos y el establecimiento del fenómeno dominante según los parámetros deseados en la simulación.**
- **Teniendo en cuenta que el mayor desgaste en el sistema siempre se dará entre los ángulos de los álabes que formen con la horizontal ángulos de 20° y 35° pues estarán más sujetos a daño.**

Anexo A. Modelo de corrosión-erosión para matlab

```
%Programa con el Modelo de erosión de OKA y stern-geary para corrosión
clear all
clc
%EROSION

% ValorM='¿Cuál es el valor de la masa que impacta (Kg/h)?';
% Masa=input(ValorM);
Masa=10;
ValorV='¿Cuál es el valor de la velocidad de impacto (m/s)?';
Vel=input(ValorV);
% ValorT='¿Cuál es el valor del tamaño de grano (micrometros)?';
% Tam=input(ValorT);
Tam=375;
Dureza=1.236; %Dureza del acero 1020
%los n son factores que dependen tambien de la velocidad, el factor que la
%maera en la que esta calculado en este diseño es para una velocidad de
%100m/s, toca conseguir y tal vez aproximar cual seria la realción de la
%velocidad allí.

n1=0.71*Dureza^0.14;
n2=2.8*Dureza^-1;

%los Factores k
K=45;
k1=-0.05;
k2=3*Dureza^(0.085);
```

k3=0.19; %parámetro que depende dela forma de la partícula

% Valores iniciales de los valores prima

dp=326; %micrometros

vp=104; %metros/segundo

b=0.75; % Constante para E90

damage=zeros(90,1);

damage_1=zeros(90,1);

% CORROSION

Carga=2;

area=1; %(diametro^2*pi)/4;

faraday=96485.3365;

Peso_molecular=55.845/Carga;

Valor_ikor='Valor de la corriente de corrosión (A/cm2)';

Icorr=input(Valor_ikor);

densidad=7.87;

Tasa_corrosion=((Icorr*Peso_molecular)/(densidad*faraday))*(3600*24*365);

Volumen_rem_cor=Tasa_corrosion*area;

for Angulo=1:90

g=(sind(Angulo)^n1)*((1+Dureza*(1-sind(Angulo)))^n2);

E=K*(Dureza^k1)*((Vel/vp).^k2)*((Tam/dp)^k3);

Erosion=g*E;

Et=Erosion*Masa*365/1000;

damage(Angulo,1)=damage(Angulo,1)+Et+Volumen_rem_cor;

Et1=Erosion*1.2*365/1000;

damage_1(Angulo,1)=damage_1(Angulo,1)+Et1+Volumen_rem_cor;

end

```
disp(damage)
```

```
plot(damage)
```

```
hold on
```

```
plot(damage_1)
```

```
title ('Pérdida de volumen por tiempo')
```

```
xlabel('Angulo de impacto')
```

```
ylabel('Corrosión-Erosión (cm3/año)')
```

```
legend({'Pérdida 10', 'Pérdida 1.2'}, 'Location', 'northeast')
```

```
%corrosión de POPOf con corrientes anodicas y catodicas dadas, ademas, de
```

```
%coeficientes de TAFEL
```

```
% % ValorCarga='¿Cuál es el valor del numero de carga?';
```

```
% % Carga=input(ValorCarga);
```

```
% % Valor_densidad='¿Cuál es el valor de la densidad (g/cm3)?';
```

```
% % densidad=input(Valor_densidad);
```

```
% densidad=7.87;
```

```
% % Valor_bc='¿Cuál es el valor de la constante catodica de tafel (V)?';
```

```
% % bc=input(Valor_bc);
```

```
% bc=-0.11;
```

```
% % Valor_ba='¿Cuál es el valor de la constante anodica de tafel (V)?';
```

```
% % ba=input(Valor_ba);
```

```
% ba=0.08;
```

```
% % Valor_pH='Valor dl pH de la solución';
```

```
% % pH=input(Valor_pH);
```

```
% pH=7;
```

```
% % Valor_ca='Valor de la corriente anodica (A/cm2)';
```

```
% % corriente_a=input(Valor_ca);
```

```
% corriente_a=10^-6;
```

```
% % Valor_cc='Valor de la corriente catodica (A/cm2)';
```

```
% % corriente_c=input(Valor_cc);
```

```
% corriente_c=10^-6;
```

```
% % Valor_d='Valor del diametro de la pieza expuesta (cm2)';
% % diametro=input(Valor_d);
% Carga=2;
% area=1; %(diametro^2*pi)/4;
% faraday=96485.3365;
% Peso_molecular=55.845/Carga;
% Valor_ikor='Valor de la corriente de corrosión (A/cm2)';
% Icorr=input(Valor_ikor);
% % Pot_base_fe=-0.440;
% % Pot_base_agua=0.401;
%
% % Potencial_o=Pot_base_agua-(0.059/2)*log10((10.^(-14+pH))^2);
% % Potencial_fe=Pot_base_fe-(0.059/2)*log10(1/0.7);
% % x=(Potencial_fe-Potencial_o+bc*log10(corriente_c)-ba*log10(corriente_a))/(bc-ba);
% % Icorr=10.^x;
% %
% % Ecorr=Potencial_fe+ba*log10(Icorr)-ba*log10(corriente_a);
% %
% % Ecorr1=Potencial_o+bc*log10(Icorr)-bc*log10(corriente_c);
% Tasa_corrosion=((Icorr*Peso_molecular)/(densidad*faraday))*(3600*24);
% Volumen_rem_cor=Tasa_corrosion*area;
```

Bibliografía

- [1] D. Landolt, « Corrosion and surface chemistry of metal »s, 1. ed. Lausanne: EPFL Press, 2007.
- [2] I. Finne, « Erosion of surfaces », *Wear*, vol. 3, pp. 87–103, 1960.
- [3] J. G. A. Bitter, « a Study of Erosion Phenomena Part I », *Wear*, vol. 6, pp. 169–190, 1963.
- [4] J. G. A. Bitter, « A study of erosion phenomena. Part II », *Wear*, vol. 6, no. 3, pp. 169–190, 1963.
- [5] M.M. Stack, B.D. Jana, « Models and mechanisms of erosion–corrosion in metals », 2011.
- [6] J. H. Neilson and A. Gilchrist, « Erosion by a stream of solid particles », *Wear*, vol. 11, no. 2, pp. 111–122, 1968.
- [7] Y. I. Oka, K. Okamura, and T. Yoshida, « Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation », *Wear*, vol. 259, no. 1–6, pp. 95–101, 2005.
- [8] Y. I. Oka and T. Yoshida, « Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage », *Wear*, vol. 259, no. 1–6, pp. 102–109, 2005.
- [9] Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa, and M. Matsumura, « The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact », *Wear*, vol. 203–204, pp. 573–579, 1997.
- [10] Y. I. Oka, M. Matsumura, and H. Funaki, « Measurements of plastic strain below an indentation and piling-up between two adjacent indentations », *Wear*, vol. 186–187, no. PARTE 1, pp. 50–55, 1995.
- [11] G. C. Pereira, F. J. de Souza, and D. A. de Moro Martins, « Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows », *Powder Technol.*, vol. 261, pp. 105–117, 2014.

- [12] M. Stern, A.L Geary, Electrochemical polarization: « I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves », J. Electrochem, Soc. 104 (1957)
- [13] A. de Jesus Motheo and L. D. Bisanha, « Adhesion of Polyaniline on Metallic Surfaces », Asp. Fundam. Appl. Conduct. Polym., no. May 2014, 2012.
- [14] C. Anzures, J. Posada, K. Osorio, J. R. Vidal Medina, V. M. Sanchez, y Y. U. Lopez, “Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Interconectadas de Colombia”, en 2018 IEEE ANDESCON, Santiago de Cali, 2018, pp. 1–6.
- [15] N. A. García et al., “ZONAS NO INTERCONECTADAS – ZNI DIAGNÓSTICO DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA 2018”, p. 74.
- [16] Redacción economica. (2019, Oct 8). La energía eólica continúa creciendo. El Espectador [Online]. Available: <https://www.elespectador.com/economia/la-energia-eolica-continua-creciendo-articulo-884914>
- [17] Grupo15Fluidos. (2016, Abr 24) Componentes de una turbina eólica.[Online] <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/componentes-de-una-turbina-eolica/>
- [18] WindFinder. (2020, Jul 12) Previsiones del viento, del oleaje y del tiempo en el cabo de vela, Boya 17 mph este-nordeste. [online] https://es.windfinder.com/forecast/cabo_de_vela_boya
- [19] A. Sharma, A. Kumar, R. Tyagi; Wear: « Erosive wear analysis of medium carbon dual phase steel under dry ambient condition », Departament of mechanical engineering, Indian institute of technology, (2014)
- [20] Y. Zao, F. Zhou, J. Yao, S. Dong, N. Li; Wear: « Erosion-corrosion behavior and corrosion resistance of AISI 316 stainless steel in flow jet impingement », Departament of thermal energy engineering, China university of petroleum. (2015)