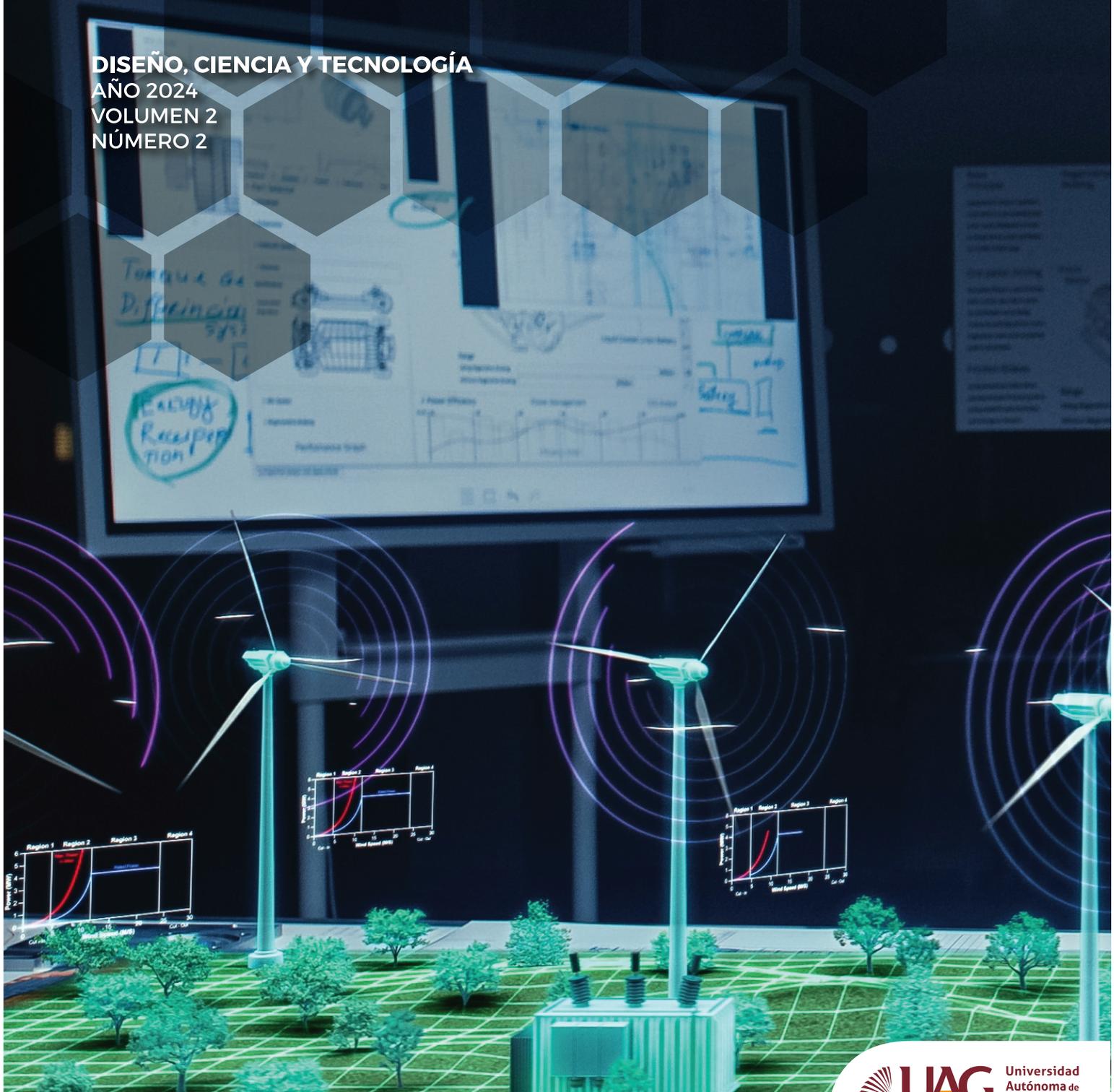


# CIENCIA Y FRONTERA

DISEÑO, CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
AÑO 2024  
VOLUMEN 2  
NÚMERO 2



uag.mx / f @ X in y



Powered by Arizona State University®

## CONTENIDO

### AÑO 2024, VOLUMEN 2, NÚMERO 2

#### DISEÑO, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

- **Crecimiento de plántulas de árboles promisorias para la remediación de áreas contaminadas con petróleo** 3 - 13
- **Diseño de entornos virtuales de aprendizaje para estudiantes de ingeniería en tiempos de COVID-19: Elaboración de laboratorios virtuales de Transferencia de Calor** 14 - 29
- **Destilación reactiva: una alternativa sustentable** 30 - 34
- **Dinámica del desarrollo de plantas de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en distintos sustratos** 35 - 42
- **Obtención del Modelo Lineal de un Parque Eólico Utilizando la Linealización Recursiva** 43 - 62
- **Estimación de inercia en sistemas eléctricos con paneles fotovoltaicos a partir de señales de voltaje simuladas en EMTP** 63 - 83
- **IoT device to Precision Agriculture in a Corn Crop** 84 - 95

## DIRECTORIO

### COMITÉ EDITORIAL

Editor principal: Dr. Efrén Aguilar Garnica

Editora Ciencias Sociales, Económico y Administrativas: Dra. Beatriz Adriana Corona Figueroa

Editora Ciencias de la Salud: Dra. Maria Guadalupe Zavala Cerna

Editora Ciencia y Tecnología: Dra. Lina Maria Aguilar Lobo

Editora UAG Tabasco: Dra. Karla Lizbeth Torres López

CIENCIA Y FRONTERA, año 2024, volumen 2, número 2, mayo – agosto 2024, es una publicación electrónica tetramestral editada por la Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Autónoma de Guadalajara, A.C., en la Avenida Patria, 1201, Colonia: Lomas del Valle, Zapopan, Jalisco, C.P. 45129, Tel. (33)36488824, <https://cienciayfrontera.uag.mx/home>, [investigacion@edu.uag.mx](mailto:investigacion@edu.uag.mx). Editor responsable: Dr. Efrén Aguilar Garnica. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-120310444300-102, ISSN: En trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de Productividad y Difusión, Mtra. Brenda Yarely Quiroz Caro, en la Avenida Patria, 1201, Colonia: Lomas del Valle, Zapopan, Jalisco, C.P. 45129, fecha de última modificación, 31 de enero de 2024.

Comentarios y sugerencias:

[cienciayfrontera@edu.uag.mx](mailto:cienciayfrontera@edu.uag.mx)

# Crecimiento de plántulas de árboles promisorias para la remediación de áreas contaminadas con petróleo

## Seedling Growth of Promising Tree Species for the Remediation of Petroleum-Contaminated Areas

José G. Chan-Quijano<sup>a\*</sup>, Anahí del Carmen Meza García<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. Calle Centenario del Instituto Juárez S/N Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México. <https://orcid.org/0000-0002-4943-1202>

<sup>b</sup> Departamento de petrolera, energía y ciencias básicas, Universidad Autónoma de Guadalajara, Campus Tabasco. Prol. Paseo Usumacinta km 3.5, Fracc. El Country, C.P. 86039, Villahermosa, Tabasco, México

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

La germinación de semillas de especies arbóreas que crecen en suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo es necesario para conocer el desarrollo vegetativo como parte de las estrategias de remediación. Por lo tanto, se evaluó el crecimiento de plántulas de diez especies arbóreas (*Bursera simaruba*, *Byrsonima crassifolia*, *Cedrela odorata*, *Eugenia capuli*, *Guazuma ulmifolia*, *Inga inicuil*, *Pachira aquatica*, *Psidium guajava*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia rosea*) promisorias para la remediación de suelos contaminados en condiciones de vivero con cuatro tratamientos pregerminativos. Para ello, se realizó un experimento con 1,560 semillas en un vivero con sombra del 60 %, se utilizó camas y bolsas negras para la evaluación del crecimiento de las especies. Los tratamientos pregerminativos aplicados fueron control, escarificación mecánica, remojo en agua durante 24 h, inmersión en agua hirviendo, remojo en ácido sulfúrico. La evaluación fue de 114 días. Los tratamientos favorecieron el crecimiento de las plántulas, siendo los mejores para alturas rápidas el remojo en ácido sulfúrico para *B. simaruba*, *G. ulmifolia* y *S. macrophylla*. Para *C. odorata* e *I. inicuil* con el control presentaron mayor crecimiento, para el *E. capuli*, *P. guajava* y *T. rosea*, la escarificación mecánica fue el mejor. Ahora bien, el mejor tratamiento para *P. aquatica* fue el remojo en agua durante 24 h y para *B. crassifolia* fue la inmersión en agua hirviendo. Los tratamientos pregerminativos, ayudaron a adquirir un crecimiento favorable y un diámetro basal adecuado e idóneo para las especies, con ello, se puede lograr estrategias de remediación y reforestación de las zonas afectadas.

**Palabras clave:** morfología, altura, diámetro del tallo, suelo contaminado, tratamientos.

### ABSTRACT

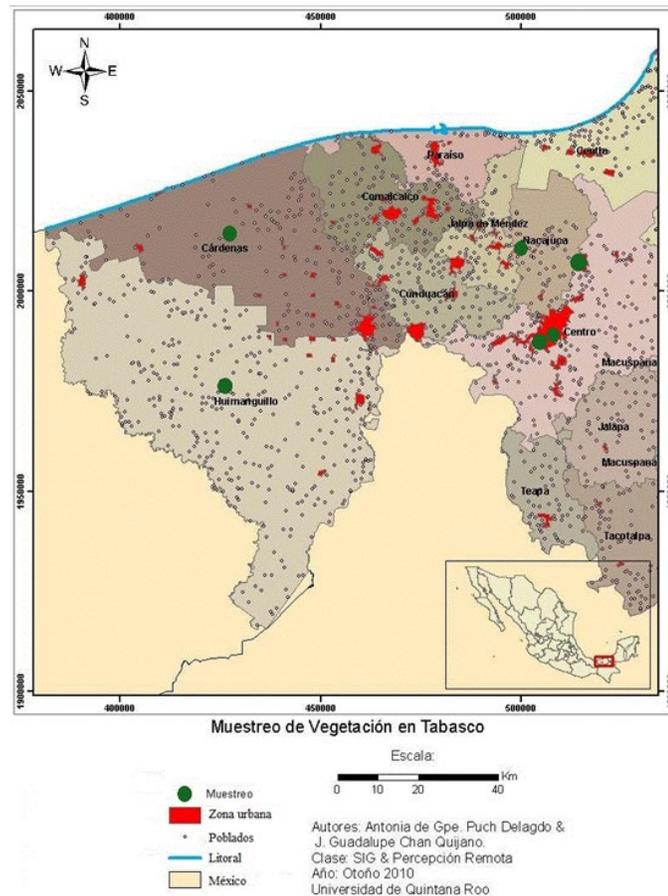
The germination of seeds of tree species that grow in soils contaminated with petroleum hydrocarbons is necessary to know the vegetative development as part of the remediation strategies. Therefore, the growth of seedlings of ten tree species (*Bursera simaruba*, *Byrsonima crassifolia*, *Cedrela odorata*, *Eugenia capuli*, *Guazuma ulmifolia*, *Inga inicuil*, *Pachira aquatica*, *Psidium guajava*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia rosea*) promising for the remediation of contaminated soils under nursery conditions with four pregerminative treatments. For this, an experiment was carried out with 1,560 seeds in a nursery with 60 % shade, beds and



en el subsuelo terrestre por transformación química de la materia orgánica. Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue evaluar las tasas de crecimiento de plántulas de diez especies arbóreas prometedoras para la remediación de suelos contaminados en condiciones de vivero con cuatro tratamientos pregerminativos.

## 2. Material y método

De acuerdo con el estudio prospectivo de Ochoa-Gaona *et al.* (2011, p.145) de especies arbóreas prometedoras para la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, se seleccionaron las especies arbóreas para este estudio. En este sentido, se colectaron semillas de *Bursera simaruba* (L.) Sarg. (1890; palo mulato), *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth (1822; nance), *Cedrela odorata* L. (1759; cedro), *Eugenia capuli* (Schltdl. & Cham.) Hook. & Arn. (escobillo), *Guazuma ulmifolia* Lam. (1789; guácimo), *Inga inicuil* Schltdl. & Cham. ex G. Don (jinicuil), *Pachira aquatica* Aubl. (1775; zapote de agua), *Psidium guajava* L. (1753; guayaba), *Swietenia macrophylla* King (1886; caoba) y *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. (macuilis) en remanentes de selvas tropicales de Tabasco, así como en parcelas que tuvieran o no algún grado de contaminación (Figura 1); solo la guayaba y el nance (frutos) se compraron en mercados de la localidad por no estar fructificando en campo, pero se conoce que son especies que toleran a los hidrocarburos del petróleo.



**Figura 1.** Colecta de semillas (puntos verdes) en la porción oeste del estado de Tabasco. Cárdenas y Huimanguillo, son los municipios con más áreas contaminadas por derrames de petróleo, seguido de Nacajuca y Centro.

Los árboles padres seleccionados presentaron características fuertes, vigorosos, con un fuste recto, sin bifurcaciones ni torceduras, buenos productores de frutos, que no presentaron plagas y se

encontraban en madurez fisiológica (Arriaga et al., 1994, p.79; Tomalá-Rossi, 2002, p.21). Además, se seleccionaron estas especies vegetales por su capacidad remediadora y por ser tolerantes a la contaminación por hidrocarburos del petróleo. Una vez colectado los frutos, se siguió las recomendaciones de Chan-Quijano (2011), es decir, los frutos se dejaron secar bajo sombra a temperatura ambiente para se abrieran de manera natural y, con ello, se logró sacar las semillas, las que posteriormente se seleccionaron y limpiaron, para almacenarlas.

Para asegurar el contenido de la humedad de la semilla y la temperatura del sitio de almacenamiento, se usó un refrigerador convencional al que se mantuvo a 8°C. Para *Byrsonima crassifolia* las semillas, se despulparon y se conservaron a temperatura ambiente como tratamiento previo (sin refrigeración). A las semillas de las 10 especies leñosas seleccionadas, se les aplicó las pruebas de germinación en un vivero experimental que tiene una maya sombra al 60 % establecido en las instalaciones de El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa, Tabasco. Se mantuvo un riego cada tercer día para mantener las condiciones de humedad entre el 50 % y el 80 % para que las semillas germinen y crezcan sin limitaciones ambientales (Chan-Quijano et al., 2012).

La germinación se realizó en tres camas de crecimiento (camellones) de 4 x 1 m cada una, utilizando como base grava sobre plástico negro para evitar que crezcan malezas y retener la humedad, una capa de arena de 10 cm, para evitar la humedad excesiva; por arriba un sustrato compuesto de suelo con cascarilla de cacao en proporción 1:1. Las semillas mayores a 1 cm se sembraron en camas para su fácil manipulación (Chan-Quijano, 2011, p.106; Chan-Quijano et al., 2012). Estas mismas semillas tuvieron una distancia de 20 x 20 cm entre filas y columnas, en las camas; en cada punto se sembraron tres semillas.

Es preciso mencionar que el sustrato utilizado en el vivero no contenía ninguna concentración de contaminante, ya que lo que se busca es apoyar a las semillas para su rápido crecimiento derivado que son especies vegetales que toleran a los hidrocarburos. Por otra parte, las semillas se marcaron con un popote de plástico conforme fueron germinando, en los cuales se marcó el número de semillas germinadas en ese momento; para conocer los porcentajes de germinación se puede consultar a Chan-Quijano et al. (2012).

Las semillas menores a 3 mm se sembraron en bolsa negras de polietileno para vivero con medidas de 20 cm de largo x 10 cm de diámetro; esto con el objetivo de evitar la pérdida de las semillas. Si las sembramos directamente en las camas podrían quedar muy enterradas o juntas, lo que impediría su buen crecimiento y su seguimiento (Chan-Quijano, 2011; Ramírez-Marcial et al., 2012, p.87).

A las semillas de cada especie se les aplicaron cuatro tratamientos pregerminativos en función de las características de la cubierta seminal, paralelamente se mantuvo un lote control al que no se le aplicó tratamiento. Para cada tratamiento se utilizaron 30 semillas de cada especie, que representó 150 semillas por tratamiento, evaluando un total de 1,500 semillas, más 60 semillas más (1,560), esto de acuerdo con el cálculo de la cantidad de semillas necesarias, considerando una cantidad extra de semillas por si alguna no tenía viabilidad (Meza-Sánchez et al., 2009 p.28; Ramírez-Marcial et al., 2012):

$$Cantidad = 125 \frac{N}{pW} \left( 1 + \frac{E}{100} \right) \quad (1)$$

Donde: N = número de plántulas requeridas que se desea obtener; p = porcentaje de germinación de las semillas (este valor se aplica cuando existe un conocimiento previo de la germinación de las semillas; en caso de no conocer el dato se aplica el 80 %; p = 0.8); W = número de semillas por kilogramo; 125 = factor de corrección que agrega un 25 % de semillas adicionales; E = cantidad extra entre 10-30 % (E = 10-30). Por otro lado, los tratamientos que se manejaron fueron: a) escarificación

mecánica (T1), b) remojo en agua durante 24 hrs (T2), c) inmersión en agua hirviendo (T3), d) remojo en ácido sulfúrico (T4) y e) sin tratamiento o control (TC; Tabla 1). La evaluación tuvo una duración de 114 días en total.

**Tabla 1.** Tratamientos pregerminativos que se aplicaron a las semillas de las especies seleccionadas y tiempos de conservación.

| Especie                      | Tratamiento*  | Días de conservación | Número total de semillas  |
|------------------------------|---|----------------------|---------------------------|
| <i>Bursera simaruba</i>      | BsT1. EQAS3MLS<br>BsT2. EQAS3MR24<br>BsT3. RAH30S<br>BsT4. RAH30SR24<br>BsT5. R24   | 60 días              | 180 semillas <sup>+</sup> |
| <i>Byrsonima crassifolia</i> | BcT1. EM<br>BcT2. EQAS2MLS<br>BcT3. EQAS3MLS<br>BcT4. EQAS3MR24                     | 8 días               | 150 semillas              |
| <i>Cedrela odorata</i>       | CoT1. R6<br>CoT2. R12<br>CoT3. R24<br>CoT4. R34                                     | 60 días              | 150 semillas              |
| <i>Eugenia capuli</i>        | EcT1. EMR24<br>EcT2. EQAS3MLS<br>EcT3. EQAS3MR24<br>EcT4. RAH30S<br>EcT5. RAH30SR24 | 60 días              | 180 semillas <sup>+</sup> |
| <i>Guazuma ulmifolia</i>     | GuT1. EQAS2MLS<br>GuT2. R30ACR24LS<br>GuT3. RAH10R24LS<br>GuT4. RAC10R24LS          | 60 días              | 150 semillas              |
| <i>Inga inicuil</i>          | IiT1. R6<br>IiT2. R12<br>IiT3. R24<br>IiT4. R34                                     | 5 días               | 150 semillas              |
| <i>Pachira aquatica</i>      | PaT1. R12<br>PaT2. R24<br>PaT3. R48<br>PaT4. R72                                    | 15 días              | 150 semillas              |
| <i>Psidium guajava</i>       | PgT1. R34<br>PgT2. RAH30S<br>PgT3. RAC5MLS<br>PgT4. RAH10R24LS                      | 15 días              | 150 semillas              |
| <i>Swietenia macrophylla</i> | SmT1. EM<br>SmT2. R24<br>SmT3. EMR24<br>SmT4. R48                                   | 60 días              | 150 semillas              |
| <i>Tabebuia rosea</i>        | TrT1. R6<br>TrT2. R12<br>TrT3. R24<br>TrT4. R34                                     | 30 días              | 150 semillas              |

\* **EM:** escarificación mecánica, **EMR24:** escarificación mecánica más remojo en agua durante 24 h, **R6:** remojo en agua durante 6 h, **R12:** remojo en agua durante 12 h, **R24:** remojo en agua durante 24 h, **R34:** remojo en agua durante 34 h, **R48:** remojo en agua durante 48 h, **R72:** remojo en agua durante 72 h, **EQAS2MLS:** escarificación química con ácido sulfúrico al 98 % por 2 minutos y lavado de semilla, **EQAS3MLS:** escarificación química con ácido sulfúrico al 98 % por 3 minutos y lavado de semilla, **EQAS3MR24:** escarificación química con ácido sulfúrico al 98 % por 3 minutos más remojo durante 24 h, **R30ACR24LS:** remojo por 30 segundos en agua caliente más remojo en agua a T° ambiente por 24 h y lavado de semilla, **RAH10R24LS:** remojo con agua hirviendo por 10 minutos más remojo en agua a T° ambiente por 24 h y lavado de la semilla, **RAC10R24LS:** remojo con agua caliente durante 10 minutos más remojo en agua a T° ambiente por 24 h y lavado de semilla, **RAH30S:** remojo en agua hirviendo por 30 segundos, **RAH30SR24:** remojo en agua hirviendo por 30 segundos más remojo en agua a T° ambiente durante 24 h, **RAC5MLS:** remojo con agua caliente por 5 minutos y lavado de semilla.

<sup>†</sup>Estas dos especies presentaron 30 semillas más por la falta de viabilidad de algunas semillas de acuerdo con la fórmula aplicada para el cálculo de las semillas.

## 2.1 Análisis estadísticos

A los datos obtenidos de crecimiento (altura), se aplicó la prueba estadística de Kruskal-Wallis (Blanco, 2000; Rodríguez-Rivas et al., 2009). Esta prueba ayudó a determinar si existen diferencias significativas dentro de la fuente de variación, ya que los datos fueron no paramétricos

## 3. Resultados

*Cedrela odorata*, *Inga inicuil*, *Tabebuia rosea* y *Byrsonima crassifolia* no presentan diferencias significativas, en cuanto a la altura en función de los tratamientos aplicados. En cambio, *Bursera simaruba*, *Swietenia macrophylla*, *Guazuma ulmifolia*, *Eugenia capuli*, *Pachira aquatica* y *Psidium guajava* si mostraron diferencias significativas en la altura en función de los tratamientos aplicados (estas especies mantuvieron un crecimiento dinámico; Tabla 2).

**Tabla 2.** Prueba de Kruskal-Wallis de la tasa de crecimiento entre los distintos tratamientos, por especie (P ≤0.05 es estadísticamente significativa).

| Especie                      | Estadístico de prueba (H) | P      |
|------------------------------|---------------------------|--------|
| <i>Bursera simaruba</i>      | 111.83                    | 0.0000 |
| <i>Byrsonima crassifolia</i> | 6.99                      | 0.1360 |
| <i>Cedrela odorata</i>       | 4.67                      | 0.3224 |
| <i>Eugenia capuli</i>        | 77.76                     | 0.0000 |
| <i>Guazuma ulmifolia</i>     | 84.03                     | 0.0000 |
| <i>Inga inicuil</i>          | 1.44                      | 0.8368 |
| <i>Pachira aquatica</i>      | 49.57                     | 0.0000 |
| <i>Psidium guajava</i>       | 75.48                     | 0.0000 |
| <i>Swietenia macrophylla</i> | 12.76                     | 0.0125 |
| <i>Tabebuia rosea</i>        | 8.10                      | 0.0879 |

Durante los 114 días de evaluación, *Bursera simaruba* alcanzó solo 12 cm (BsT2) y 8.3 cm (BsT5) de altura en las plántulas, ya que el resto de las semillas no germinaron, el control (BsC) al principio de su germinación alcanzó 3.5 cm de altura, pero al igual que el guácimo por cuestiones naturales murió. Las plántulas de *Byrsonima crassifolia* alcanzaron una altura por tratamiento de 7.6 cm (BcT2) y 6.7 cm (BcT3). Estas plántulas tienen una ligera altura a comparación de los otros tratamientos. El crecimiento de *Cedrela odorata* en este trabajo, muestran una altura de crecimientos

medios al inicio de su germinación, 9.7 cm en promedio.

*Eugenia capuli* presentó las menores tasas de crecimiento con 6 cm de altura (EcT1), ya que el resto de las semillas no germinaron con respecto al resto de las otras especies. *Guazuma ulmifolia* mostró una tasa de crecimiento de 18.5 cm (GuT3) y 23.4 cm (GuT4) las altas, el control (GuC) y el GuT1 después de la siembra si germinaron, pero por cuestiones naturales las plántulas murieron. *Inga inicuil* obtuvo altura promedio de 10.45 cm, alcanzando una altura final máxima de 22 cm (IiT1).

*Pachira aquatica* mostró un crecimiento muy rápido dando como resultado alturas máximas de hasta 95 cm (PaT2). El crecimiento de *Psidium guajava* alcanzó una altura de 8.6 cm (PgT1) y de 7.5 cm (PgT2) como crecimiento promedio. *Swietenia macrophylla* alcanzó alturas promedio mayores de 20 cm, después de germinar su crecimiento comenzó rápido mostrando alturas de hasta 29.3 cm (SmT3). Al igual que el cedro el *Tabebuia rosea* obtuvo crecimientos medios de 8.00 cm, alcanzando 15.4 cm (TrT3) como la altura máxima (Tabla 3, referencia de los tratamientos).

**Tabla 3.** Crecimiento (altura) de las diez especies arbóreas, con los diferentes tratamientos aplicados.

| Especie                      | Crecimiento promedio (altura) por especie (cm) |      |      |      |      |      |
|------------------------------|--|------|------|------|------|------|
|                              | C  | T1   | T2   | T3   | T4   | T5   |
| <i>Bursera simaruba</i>      | 3.5  | 0    | 12   | 0    | 0    | 8.3  |
| <i>Byrsonima crassifolia</i> | 5.8  | 2.4  | 7.6  | 6.7  | 5.7  | ---- |
| <i>Cedrela odorata</i>       | 15.6   | 14.2 | 13   | 13.7 | 13.3 | ---- |
| <i>Eugenia capulí</i>        | 0  | 6    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <i>Guazuma ulmifolia</i>     | 1.6  | 2.5  | 14   | 18.5 | 23.4 | ---- |
| <i>Inga inicuil</i>          | 20   | 22   | 18.3 | 17.5 | 21   | ---- |
| <i>Pachira aquatica</i>      | 85   | 31   | 95   | 87.5 | 76   | ---- |
| <i>Psidium guajava</i>       | 5.3  | 8.6  | 7.5  | 0    | 0    | ---- |
| <i>Swietenia macrophylla</i> | 24.5   | 23   | 24.5 | 29.3 | 28   | ---- |
| <i>Tabebuia rosea</i>        | 12.5   | 14.3 | 14.3 | 15.4 | 11.5 | ---- |

#### 4. Discusión

Rincón et al. (2007) y Ochoa-Gaona et al. (2008a) mencionan que el crecimiento de las plántulas es el resultado del genotipo y del ambiente que las rodea; en el vivero la humedad y la sombra se mantienen relativamente constantes si se compara con la variabilidad del ambiente; sin embargo, la influencia de los cambios ambientales y cualquier variable producirán efectos sobre el crecimiento. El análisis de crecimiento en las plántulas de las especies arbóreas es una herramienta ampliamente usada en áreas tan diferentes como en el fitomejoramiento, la fisiología y en la ecología de las plantas. De acuerdo con el crecimiento de plántulas de *C. odorata*, *I. inicuil*, *P. aquatica*, *S. macrophylla* y *T. rosea* son especies de crecimiento rápido (Tabla 4, referencia de las especies en su crecimiento).

**Tabla 4.** Especies de mayor crecimiento después de su germinación con referencia al hipocótilo y diámetro del tallo.

| Especie                      | Hipocótilo | Diámetro del tallo | Días de germinación |
|------------------------------|------------|--------------------|---------------------|
| <i>Cedrela odorata</i>       | 9 cm       | 0.2 mm             | 52                  |
| <i>Inga inicuil</i>          | 3.5 cm     | 0.4 mm             | 32                  |
| <i>Pachira aquatica</i>      | 2.5 cm     | 1 cm               | 58                  |
| <i>Swietenia macrophylla</i> | 2.3 cm     | 0.4 mm             | 74                  |
| <i>Tabebuia rosea</i>        | 7 cm       | 0.2 mm             | 44                  |

Davidson et al. (1998) considera que el ritmo de crecimiento, pueden considerarse análogos (que tiene la misma función, pero con un origen diferente) y que el diámetro del tallo es una variable utilizada en viveros para definir el momento en que las plantas están aptas para trasplantarse pues es un factor para considerar en los procesos de reforestación, restauración y manejo de especies

forestales.

De esta manera, Márquez-Ramírez et al. (2005) en su evaluación de crecimiento inicial de plántulas de *C. odorata* obtuvo como resultados 20 cm de altura con un diámetro de 0.92 a 3.08 mm, mientras que Negreros-Castillo et al. (2010), encuentran mayor efecto en la etapa de crecimiento de las plántulas en el vivero depende de la calidad del sustrato y de los tratamientos aplicados. Ya que con el efecto de estos se manifiesta el crecimiento en altura y el área de la base de la plántula, es así como *S. macrophylla* alcanzó una altura de 25-40 cm con un diámetro de la base de 0.44-0.33 mm.

*C. odorata* obtuvo 15-43 cm de altura y con un diámetro de 0.14-0.55 mm y *T. rosea* mostró una altura de 15-28 cm con un diámetro de base de 0.12-0.36 mm, pero el crecimiento en altura y diámetro base están afectadas por el acervo genético específico de cada especie, que permite clasificarlas como de lento o rápido crecimiento. Vargas-simón et al. (2009) en su trabajo con el *I. inicuil* encontró mayor crecimiento de longitud del tallo fue de 30 cm obteniendo plántulas con radículas mayores a 2 cm. Estas semillas son apropiadas para obtener plántulas mejor desarrolladas en el menor tiempo, cuando alcanzan una longitud de tallo aproximado a los 30 cm.

Por otro lado, Sánchez-Sánchez y Hernández-Zepeda (2004) muestran en su estudio que *P. aquatica* alcanzó 1.5-2 mm de diámetro del tallo y el hipocótilo obtuvo 1-2 cm. Por lo menos, en esta investigación, estas cinco especies son las que presentaron un crecimiento rápido. Por lo tanto, las especies que presentaron crecimiento lento fueron *B. simaruba*, *B. crassifolia*, *E. capuli*, *G. ulmifolia* y *P. guajava* (Tabla 5, referencia de las especies).

**Tabla 5.** Especies de lento crecimiento después de su germinación con referencia al hipocótilo y diámetro del tallo.

| Especie                      | Hipocótilo | Diámetro del tallo | Días de germinación |
|------------------------------|------------|--------------------|---------------------|
| <i>Bursera simaruba</i>      | 5.5 cm     | 0.2 mm             | 54                  |
| <i>Byrsonima crassifolia</i> | 5.5 cm     | 0.1 mm             | 50                  |
| <i>Eugenia capulí</i>        | 1.2 cm     | 0.1 mm             | 50                  |
| <i>Guazuma ulmifolia</i>     | 8 cm       | 2.2 mm             | 64                  |
| <i>Psidium guajava</i>       | 3.5 cm     | 0.1 mm             | 50                  |

De acuerdo con Francis (1990, p.5) las plántulas de *B. simaruba* por lo general crecen a una tasa moderada con diámetros a la altura del pecho iniciales de 4 a 15 cm y con un diámetro de 0.28 mm. En este sentido, las semillas de esta especie tal vez estaban inmaduras o los tratamientos aplicados no la favorecieron. *B. crassifolia* después de 50 días muestra que es una especie de crecimiento lento pues hasta estos días solo alcanzó una altura de 7.6 cm como máxima. Según Ochoa-Gaona et al. (2008b) frecuentemente se encuentra creciendo en terrenos pedregosos y arenosos con alturas medias de 20 cm en un mes, con un diámetro de 0.3 mm sin tratamientos, en su forma biológica alcanza hasta 10 m de alto y 20 cm de diámetro en su etapa adulta.

Rebollar-Domínguez y Tapia-Torres (2010) mencionan que *E. capuli* en su etapa adulta es un árbol de 6 a 12 m de altura con el tallo de 20 cm de diámetro, en este caso el hipocótilo obtuvo 1.2 cm y de diámetro 0.1 mm, esto debido a que solo EcT1 germinó. *G. ulmifolia* es un árbol el cual se conoce poco sobre su etapa de desarrollo de crecimiento, al respecto, Manríquez-Mendoza (2010, p.88) obtuvo resultados de crecimiento máximas de 35.3, 22.8, 17.6 y 19.2 cm con diámetros de 1.0, 0.8, 0.6 y 0.6 mm respectivamente con 13 y 15 semanas de edad, en esta investigación *G. ulmifolia* tuvo alturas similares al igual que los diámetros.

Chirinos-Torres et al. (2006) en su investigación de crecimiento y producción con cuatro tratamientos (volúmenes diarios de agua y frecuencia de riego) para *P. guajava* alcanzó alturas de T1 y T4-3 cm,

T2 y T3-4 cm no considerando los diámetros ya que los tallos son pequeños y no fueron considerados por los autores. Zamora-Cornelio et al. (2010) y Pérez-Hernández et al. (2011) mencionan que el crecimiento de las plántulas está directamente relacionado con el nivel de competencia por la luz, la cantidad de agua y por los tratamientos aplicados, mismas que ayudaron al crecimiento de las plántulas de las especies utilizadas en este trabajo.

En este sentido y de acuerdo con Sánchez-Sánchez y Hernández-Zepeda (2004) las plántulas se mantienen verdes a lo largo de su desarrollo, lo cual debe considerarse en su descripción, ya que el color de las partes y órganos de la planta son característicos y sus cambios dependen principalmente con la edad de la plántula (alturas).

## 5. Conclusiones

Los tratamientos pregerminativos favoreció el crecimiento de las plántulas, siendo los mejores para alturas rápidas el SmT4 para *S. macrophylla*, BsT4 para *B. simaruba* y el GuT4 para el *G. ulmifolia*. Para el *C. odorata* e *I. inicuil* se recomienda el control (CoC y LiC; sin tratamiento), para *E. capuli* (EcT1), *T. rosea* (TrT1) y *P. guajava* (PsT1). Los tratamientos buenos para aplicar al *P. aquatica* se recomiendan el PaT2 y para *B. crassifolia* el BcT3. Estos tratamientos ayudan a adquirir un crecimiento favorable y un diámetro basal adecuado e idóneo para reforestar lo rápido una zona afectada.

Los hallazgos descritos en el presente artículo resaltan la importancia de estas investigaciones y deja base para futuras investigaciones con relación a especies vegetales que crecen y desarrollan en áreas contaminadas por derrames de petróleo. De igual forma, se debe resaltar claramente la aportación de la revisión del estado del arte de la técnica utilizada, así como las áreas de oportunidad en esta investigación

## Referencias

- Arriaga MV, Cervantes VG, Vargas-Mena A. (1994). Manual de reforestación con especies nativas: colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas. Secretaría Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Nacional Autónoma de México.
- Blanco FA. (2000). Métodos apropiados de análisis estadísticos subsiguientes al análisis de varianza (ANDEVA). *Agronomía Costarricense*, 25, 53-60.
- Caballinas L, Carstens G, Lovecchio JP, Marshall PA, Rebori L, Soldo JC, Vallejo E, Vergani G. (2013). Hidrocarburos convencionales y no convencionales. *Ciencia Hoy*, 23(134), 41-48.
- Castro-Mancilla YV, de la Rosa-Manzano E, Castro-Nava S, Martínez-Avalos JG. (2019). Physiological responses of *Quercus oleoides* (Schltdl & Cham) to soils contaminated by diesel. *Plant Production Science*, 22(4), 519-529. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1605833>
- Chan-Quijano JG, Cach-Pérez MJ, López-Mejía M. (2021). Especies vegetales con uso potencial en la remediación de zonas contaminadas en México. *Revista Forestal del Perú*, 36(1), 22-46. <https://doi.org/10.21704/rfp.v1i36.1703>
- Chan-Quijano JG, Ochoa-Gaona S, Pérez-Hernández I, Gutiérrez-Aguirre MA, Saragos-Méndez J. (2012). Germinación y sobrevivencia de especies arbóreas que crecen en suelos contaminados por hidrocarburos. *Teoría y Praxis*, 12, 102-119. <https://doi.org/10.22403/UQROOMX/TYP12/05>
- Chan-Quijano JG. (2011). Aplicación de técnicas de germinación a semillas de especies leñosas nativas promisorias para la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en Tabasco, México (tesis de licenciatura). Quintana Roo, México: Universidad de Quintana Roo.
- Chan-Quijano, J. G. (2015). Evaluación de la degradación de hidrocarburos del petróleo por bioestimulación con abonos orgánicos asociados a especies arbóreas (tesis de maestría en ciencias). El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

- Chirinos-Torres D, Marín-Larreal M, González-Palmar C, Lara C. (2006). Crecimiento y producción de plantas de guayabo (*Psidium guajava* L.) bajo riego e incidencia de frutos enfermos. *Revista Facultad Agronómica*, 23, 58-66.
- Davidson R, Gragnon D, Mauffett Y, Hernández H. (1998). Early survival, growth and foliar nutrients in native ecuatorial trees planted on degraded volcanic soil. *Forest Ecology Management*, 105, 1-19. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00295-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00295-8)
- Ferrera-Cerrato R, Rojas-Avelizapa GN, Poggi-Varaldo MH, Alarcón A, Cañizares-Villanueva OR (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 179-187.
- Francis JK. (1990). *Bursera simaruba* (L.) Sarg. Almácigo, gumbo limbo. Forest Service, U.S.: Department of Agriculture. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/30396>
- Manríquez-Mendoza LY. (2010). Establecimiento, calidad del forraje y productividad de un sistema silvopastoril intensivo bajo pastoreo de bovinos y ovinos en el trópico sub-húmedo (tesis doctoral). Veracruz: El Colegio de Postgraduados.
- Márquez-Ramírez J, Xotla-Valdés U, González-De la Torre JE. (2005). Estudio de germinación y crecimiento inicial de plántulas de *Cedrela odorata* L. *Foresta Veracruzana*, 7, 45-52.
- Meza-Sánchez R, Ruíz-Espinosa FH, Navejas-Jiménez J. (2009). Guía para la producción de plantación con especies nativas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y Centro de Investigación Regional Noroeste Campo Experimental Todos Santos.
- Mundarain S, Martín C, Cañizares A. (2005). Fenología del crecimiento y desarrollo de plántulas de ají dulce (*Capsicum frutescens* L.). *Revista UDO Agrícola*, 5(1), 62-67.
- Negreros-Castillo P, Apodaca-Martínez M, Mize CW. (2010). Efecto de sustrato y densidad en la calidad de plántulas de cedro, caoba y roble. *Madera y Bosques*, 16, 7-18. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1621169>
- Ochoa-Gaona S, Pérez-Hernández I, Frías-Hernández JA, Jarquín-Sánchez A, Méndez-Valencia A. (2011). Estudio prospectivo de especies arbóreas promisorias para la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *El Colegio de la Frontera Sur*.
- Ochoa-Gaona S, Pérez-Hernández I, Jiménez-Pérez NC. (2008b). Descripción de las especies de árboles más comunes de la sierra de Tenosique, Tabasco, México. *El Colegio de la Frontera Sur*.
- Ochoa-Gaona S, Villanueva-López G, Hernández-Margalli I, Pérez-Hernández I. (2008a). Manual de semillas de especies forestales de las montañas de Tenosique, Tabasco. *El Colegio de la Frontera Sur*.
- Pennington TD, Sarukhán J. (2005). Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies. Fondo de Cultura Económica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez-Hernández I, Ochoa-Gaona S, Adams RH, Rivera-Cruz MC, Pérez-Hernández V, Jarquín-Sánchez A, Geissen V, Martínez-Zurimendi P. (2017). Growth of four tropical tree species in petroleum-contaminated soil and effects of crude oil contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 1769-1783. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7877-5>
- Pérez-Hernández I, Ochoa-Gaona S, Vargas-Simón G, Mendoza-Carranza M, González-Valdivia NA. (2011). Germinación y supervivencia de seis especies nativas de un bosque tropical de Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 17(1), 71-91. <https://doi.org/10.21829/myb.2011.1711155>
- Ramírez-Marcial N, Luna-Gómez A, Castañeda-Ocaña HE, Martínez-Icó M, Holz SC, Camacho-Cruz A, González-Espinosa M. (2012). Guía de propagación de árboles nativos para la recuperación de bosques. Chiapas, México. *El Colegio de la Frontera Sur*.
- Rebollar-Domínguez S, Tapia-Torres NA. (2010). Anatomía de la madera de dos especies de *Eugenia* (Myrtaceae) de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques*, 16, 85-98. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1611181>

- Reed R.C., Bradford K.J., Khanday I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, 128, 450-459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>
- Rincón A, Ligarreto G, Sanjuanelo D. (2007). Crecimiento del maíz y los pastos (*Brachiaria* sp.) establecidos en monocultivo y asociados en suelos ácidos del piedemonte llanero colombiano. *Revista Agronomía Colombiana*, 25, 264-272.
- Rodríguez-Rivas G, Dorantes-López J, Aquino-Rodríguez E. (2009). Ensayo de especies forestales en la zona cálida del centro del Estado de Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 11, 19-24.
- Sánchez-Sánchez O, Hernández-Zepeda C. (2004). Estudio morfológico de plántulas de la familia Bombacaceae en Quintana Roo. *Foresta Veracruzana*, 6, 1-6.
- Tomalá-Rossi MA. (2002). Evaluación de tratamientos para aumentar la germinación en la semilla de aguacate (tesis de licenciatura). Honduras: Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH).
- Valle-Doménech A, Ochoa-Gaona S. (2008). Tratamientos pregerminativos y germinación de semillas de quince especies forestales nativas de selvas húmedas de México. Tenosique, Tabasco: Primer Encuentro de Investigación Científica de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Vargas-Simón G, Pire R, de la O de la O K. (2009). Efecto de la longitud radicular al momento del trasplante sobre el crecimiento vegetativo de cuijinicuil (*Inga jinicuil* Schtdl, & Cham. ex. Ge. Don) en invernadero. *Agrociencia*, 43, 603-608.
- Zamora-Cornelio LF, Ochoa-Gaona S, Vargas-Simón G, Castellanos-Albores J, de Jong BHJ. (2010). Germinación de semillas y claves para la identificación de plántulas de seis especies arbóreas nativas de humedales del suroeste de México. *Revista de Biología Tropical*, 58, 717-732.

# Diseño de entornos virtuales de aprendizaje para estudiantes de ingeniería en tiempos de COVID-19: Elaboración de laboratorios virtuales de Transferencia de Calor

## Designing Virtual Learning Environments for engineering students during COVID-19 pandemic: Development of virtual labs for Heat Transfer

José E. Cuevas Pérez-Gómez<sup>a</sup>, Sergio D. Schiavone-Valdéz<sup>a,b</sup>, Walter M. Warren-Vega<sup>a</sup>, Marco A. Zárate-Navarro<sup>b</sup>, Armando Campos-Rodríguez<sup>b</sup>, Luis A. Romero-Cano<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. Calle Centenario del Instituto Juárez S/N Col. Reforma, C.P. 86080, Villahermosa, Tabasco, México. <https://orcid.org/0000-0002-4943-1202>

<sup>b</sup> Departamento de petrolera, energía y ciencias básicas, Universidad Autónoma de Guadalajara, Campus Tabasco. Prol. Paseo Usumacinta km 3.5, Fracc. El Country, C.P. 86039, Villahermosa, Tabasco, México.

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

El 20 de marzo del 2020 la enseñanza presencial en Jalisco, México, fue suspendida debido a la pandemia ocasionada por la propagación de SARS-CoV-2. Esto inmediatamente puso en peligro la conclusión de cursos escolares. La presente comunicación muestra estrategias efectivas de enseñanza implementadas para abordar temas de transferencia de calor a nivel licenciatura para las carreras de ingeniería de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) durante las restricciones escolares. La investigación se centró en diseñar prácticas virtuales para comprender fenómenos de transferencia de calor empleando el software de acceso libre Energy2D, así como su implementación dentro de un nuevo entorno virtual de aprendizaje. Para definir las actividades de las prácticas primeramente se definieron los objetivos de aprendizaje y se estudiaron de acuerdo con la taxonomía 2D de Anderson & Krathwohl. Las prácticas se diseñaron para comprender los fenómenos de conducción, convección y radiación de calor. La estrategia didáctica se evaluó en la asignatura de Fenómenos de Transporte en los periodos 2020-02, 2021-02 y 2021-03 para alumnos de ingeniería química, biotecnología y alimentos. Mediante su aplicación fue posible concluir satisfactoriamente los cursos durante las restricciones escolares, además permitió introducir a los alumnos a conceptos básicos de simulación de procesos asistidos por computadora.

**Palabras clave:** Educación en Ingeniería, Restricciones escolares COVID-19, Transferencia de Calor, Entornos virtuales de Aprendizaje, Energy2D.



Prince & Felder, 2006). Se han realizado varias pruebas para evaluar el proceso de transferencia de conocimiento en el uso de simuladores informáticos y su impacto en diferentes situaciones mostrando resultados positivos, además de tener la ventaja de ser accesibles a docentes y estudiantes (Bossard et al., 2008; Chou & Liu, 2005; Fu, 2003). Así, estudios como el propuesto por Gillet et al., (2001) han incorporado algunos simuladores para entornos de acceso remoto que ayudaban al aprendizaje virtual, dando resultados satisfactorios. Del mismo modo, otros grupos de investigación, como Davidovitch et al., (2006); Fraser et al., (2007), demostraron la viabilidad de su uso para cursos significativamente diferentes, como gestión de proyectos y mecánica de fluidos, respectivamente.

De esta forma, el uso de herramientas computacionales de libre acceso puede permitir a los estudiantes de ingeniería representar de forma didáctica diversos escenarios de la industria o de la investigación científica. Estas herramientas pueden ayudarlos a comprender los fenómenos que se pueden encontrar en sus futuros trabajos. Estudios recientes han demostrado la eficacia de estas herramientas al demostrar que su uso permite a los estudiantes proponer una resolución a los problemas difíciles de analizar por los métodos tradicionales de enseñanza, que se limitan a resolver problemas matemáticos a mano (Alanís Navarro et al., 2019; Malgieri & Onorato, 2020; Rodríguez & Niño, 2016; Sutjahja et al., 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, se propone una estrategia en la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) para promover el aprendizaje durante las restricciones de confinamiento, incorporando las tecnologías de la información y la comunicación en sus carreras de ingeniería al Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología. Departamento de diseño). Por lo anterior, se planteó el diseño de un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) con el propósito de facilitar la diversificación de las modalidades de enseñanza y acompañar el trabajo de los docentes y estudiantes de la UAG, poniendo a disposición un conjunto de herramientas y entornos de aprendizaje. Un VLE se puede definir como un sitio web con acceso remoto a herramientas para apoyar actividades educativas presenciales o como la estrategia principal en la organización e implementación de cursos en línea (Horton, 2000). Un entorno informático apoya las actividades docentes utilizando tecnologías de la información que darán herramientas para dos objetivos principales: a) transmisión de contenidos de aprendizaje, b) apoyo a la comunicación (Kozaris, 2010). En este proyecto de investigación se llevó a cabo el desarrollo de un entorno virtual de aprendizaje de Fenómenos de Transferencia y Transporte de Calor para estudiantes de Biotecnología, Alimentos e Ingeniería Química. Para lograrlo, se puede fusionar la incorporación de la suite institucional Microsoft Office 365, Moodle y sitio web con acceso remoto a entornos virtuales para reemplazar las experiencias presenciales por herramientas en línea. Este sitio, denominado Laboratorio Virtual, tiene integrado un software de libre acceso Energy2D. Este software es un programa de simulación multifísica interactivo que puede modelar los tres mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) y su acoplamiento con la dinámica de fluidos (Xie, 2012). Esta elección se basa en la flexibilidad de la aplicación que permite diseñar experimentos virtuales para probar hipótesis cualitativas simples o resolver problemas de ingeniería sin recurrir a matemáticas complejas. Una vez implementado el EVA, se aplicó la estrategia pedagógica con varias cohortes de estudiantes de ingeniería durante 2020 y 2021.

## 1.2 Hipótesis

La implementación de entornos virtuales de aprendizaje en asignaturas con laboratorio pertenecientes al Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología de la UAG permitirán mantener operando los servicios educativos curriculares durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2.

## 1.3 Objetivo

Cumplir con las sugerencias emitidas por la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) en 2020 para mantener operando los servicios educativos curriculares durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2. Así como garantizar la continuidad de las actividades académicas manteniendo los estándares de calidad de la UAG.

## 2. Material y método

### 2.1 Definición de objetivos de aprendizaje en prácticas virtuales según la taxonomía de Anderson & Krathwohl (A&K) 2D

Las actividades en cada una de las prácticas virtuales se determinaron a partir de la definición de los objetivos didácticos. De esta forma, fue posible asegurar la estimulación y aplicación de procesos de pensamiento secuencial para garantizar la adquisición, operacionalización de conocimientos y habilidades, reflejo de competencias interiorizadas a partir de acciones estratégicas propuestas durante la planificación de las prácticas virtuales.

Los objetivos de aprendizaje se definieron de la siguiente manera:

**Objetivo 1:** Comprender los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación).

**Objetivo 2:** Diseño del montaje mediante la selección de los accesorios adecuados para el estudio de los fenómenos de transferencia de calor.

**Objetivo 3:** Aplicar los conceptos básicos de transferencia de calor para resolver problemas de ingeniería.

**Objetivo 4:** Demostrar los fenómenos de transferencia de calor a través de experimentos diseñados mediante simulación asistida por computadora.

La dimensión del proceso cognitivo consiste en:

1. Recordar: Recuperar conocimientos relevantes de la memoria a largo plazo.
2. Comprender: Construir significado a partir de mensajes instructivos que incluyan comunicación oral, escrita y gráfica.
3. Aplicar: Realizar o utilizar un procedimiento en una situación dada.
4. Analizar: Dividir el material en sus partes constituyentes y determinar cómo se relacionan los aspectos entre sí y con una estructura o propósito general.
5. Evaluar: Emitir juicios basados en criterios y normas.
6. Crear: juntar elementos para formar un todo coherente o funcional.

Mientras que la dimensión del conocimiento está conformada por:

1. Hechos: Elementos esenciales que los estudiantes deben conocer para familiarizarse con una disciplina o resolver problemas en ella.
2. Conceptos: Interrelaciones entre los elementos cruciales dentro de una estructura más amplia que les permite funcionar juntos.
3. Procedimientos: métodos y criterios de investigación para el uso de habilidades, algoritmos, técnicas y estrategias.
4. Metacognitivo: Conocimiento de la cognición en general, así como conciencia y conocimiento de una cognición.

**Tabla 1.** Clasificación de los objetivos basada en la taxonomía bidimensional de Anderson y Krathwohl

**Prácticas Virtuales de Transferencia de Calor**

**Taxonomía de Anderson y Krathwohl**

| Dimensión del Conocimiento | Dimensión del Proceso Cognitivo |            |         |          |         |        |
|----------------------------|---------------------------------|------------|---------|----------|---------|--------|
|                            | Recordar                        | Comprender | Aplicar | Analizar | Evaluar | Crear  |
| Fáctico                    |                                 |            | Obj 3.  |          |         |        |
| Conceptual                 | Obj 1.                          |            |         |          |         | Obj 2. |
| Procedimental              |                                 | Obj 2.     |         | Obj 4.   |         |        |
| Metacognitivo              |                                 |            |         |          | Obj 4.  |        |

**2.2 Diseño de un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) para estudiantes de ingeniería**

El establecimiento del EVA consistió en incorporar las herramientas del Campus Digital de la UAG (Microsoft Office & Moodle) y el software informático Energy2D. El acceso al EVA para los estudiantes se ha realizado ingresando a su cuenta institucional. Una vez que los estudiantes inician sesión en la suite de Microsoft, tienen acceso a las plataformas digitales de Microsoft Teams, una aplicación para realizar sesiones en línea, y Microsoft Stream, para reproducir las sesiones grabadas en cualquier momento si lo necesitan. La unificación de estos programas ha apoyado el establecimiento de aulas virtuales donde se habilitará un espacio para sesiones sincrónicas (transmisión en vivo del disertante) y asincrónicas (trabajo independiente basado en diseño instruccional). Moodle permite el almacenamiento en la nube, en el que hay un intercambio de conferencias, problemas, tareas y pruebas entre los estudiantes y el profesor. Finalmente, la integración del software Energy2D permitió al alumno disponer de un espacio utilizado como Laboratorio Virtual para replicar experimentos de laboratorio.

**2.3 Diseño de prácticas virtuales de Transferencia de Calor**

Para cumplir con el programa académico y estar dentro de lineamientos de enseñanza de alta calidad, el EVA cuenta con un espacio de Laboratorio Virtual a través del software de libre distribución Energy2D, un simulador bajo licencia MIT no extensible a creaciones propias. Las prácticas virtuales implementadas en el EVA consistieron en pruebas que permiten comprender los fenómenos de conducción, convección y radiación. En la primera práctica, el objetivo era introducir al alumno en el uso de un programa de simulación para modelar fenómenos de transferencia de calor en la cual se comienza mostrando el uso de la interfaz del software. Posteriormente, se diseña un experimento junto con el estudiante para describir la transferencia de calor por conducción en una barra entre dos bloques a diferentes temperaturas. Para resolver el problema, el estudiante debe crear un bloque rectangular con dimensiones definidas, proporcionar las propiedades térmicas del material, colocar sensores de temperatura (T), sensores de flujo de calor ( $q = Q/A$ , donde Q es el flujo de calor y A es el área), y definir las condiciones operativas del proceso. Finalmente, cuando se ejecuta la simulación, los sensores virtuales adquieren datos para graficar T vs. la posición necesaria para resolver el ejercicio con la Ley de Fourier.

En la segunda práctica, se le pide al estudiante que diseñe un experimento para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección de una fuente de calor a su entorno. Como en la práctica anterior, la solución del ejercicio es bocetar objetos en el entorno virtual e introducir las propiedades físicas de los objetos virtuales. La simulación permite obtener gráficos de t vs. T vs. q and Tsup vs. q. Usando la Ley de enfriamiento de Newton, es posible resolver la tarea.

Finalmente, la tercera práctica consistió en diseñar un experimento de determinación de la constante de Stefan-Boltzmann. En este caso se incluyen los conceptos de radiación, cuerpo negro y

emisividad.

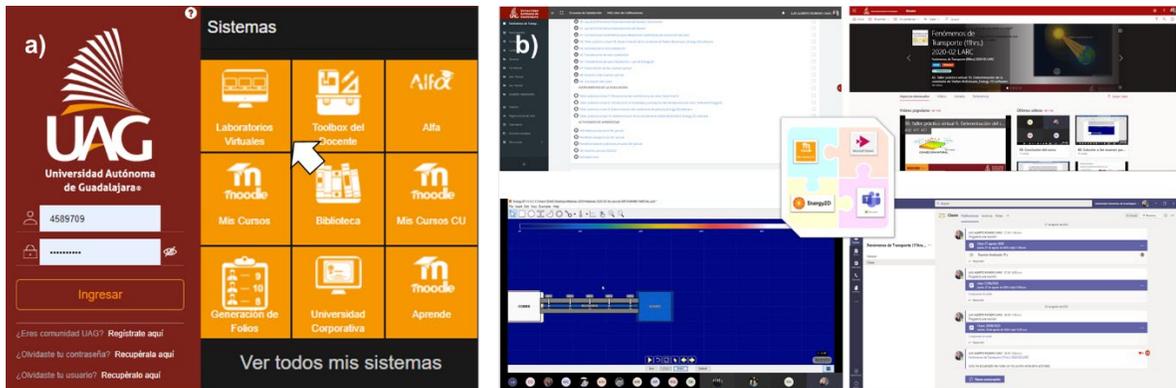
## 2.4 Implementación del EVA en estudiantes de ingeniería

La implementación del EVA y las prácticas virtuales diseñadas se realizaron en la asignatura de Fenómenos de Transporte en grupos combinados de Ingeniería en Alimentos, Ingeniería Química e Ingeniería en Biotecnología. Los periodos evaluados fueron 2020-02 (n = 42), 2021-02 (n = 26), 2021-03 (n = 14). Luego de la aplicación en cada término, se realizó el análisis y discusión de los resultados. Finalmente, las calificaciones finales de los periodos mencionados se contrastaron contra los correspondientes al 2018-02 (n = 17) y 2021-02 (n = 13), a fin de corroborar la hipótesis del trabajo.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Diseño e implementación de un entorno virtual para estudiantes de transferencia de calor en ingeniería.

La configuración del Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) consistió en integrar la suite Microsoft Office 365, Moodle y el software interactivo de libre acceso Energy2D dentro del Campus Digital de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG), Figura 1. Mediante el uso de la cuenta institucional, se es posible acceder a las herramientas VLE. El video complementario 1 (ver Tabla 2) muestra el VLE integrado y señala cada una de las herramientas que se han integrado.



**Figura 1.** Implementación del Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) mediante la integración de: (a) Campus Digital de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) con (b) la suite Microsoft Office 365, Moodle y el software de libre acceso Energy2D.

**Tabla 2.** Enlaces de acceso para descargar videos complementarios: Integración de EVA y prácticas virtuales de transferencia de calor (capacitación del uso del EVA y software Energy2D).

| VIDEOS   | DOWNLOAD LINK   |
|--|---|
| Video 1. Implementación de EVA a través de la integración de las herramientas de Microsoft Office 365, Moodle y el software Energy2D | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=IIUNpm2U3n0">https://www.youtube.com/watch?v=IIUNpm2U3n0</a> |
| Video 2. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por conducción   | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=B2z-UDa1Q48">https://www.youtube.com/watch?v=B2z-UDa1Q48</a> |
| Video 3. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por convección   | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=4w1XdGeq8XQ">https://www.youtube.com/watch?v=4w1XdGeq8XQ</a> |
| Video 4. Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por radiación  | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=KngD7N47ltM">https://www.youtube.com/watch?v=KngD7N47ltM</a> |

### 3.2 Diseño e implementación de talleres prácticos virtuales dentro del EVA

La asignatura de Fenómenos de Transporte tiene programadas sesiones de dos horas de laboratorio a la semana. Debido a las restricciones de confinamiento para reducir la propagación del COVID-19, estos debieron reestructurarse para realizarse de forma remota. A continuación, se presentan tres de las actividades diseñadas para realizar prácticas virtuales utilizando el software Energy2D integrado en el VLE. Es importante señalar que todas las dimensiones de la práctica virtual corresponden a largo por alto (L, cm x h, cm) con un área transversal constante.

### 3.2.1 Taller práctico virtual 1: Conducción del calor

#### Conceptos básicos

La transferencia de calor por conducción se logra a través de dos mecanismos: el primer mecanismo es una interacción molecular, en la que las moléculas en niveles de energía relativamente más altos (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes en niveles más bajos. Este tipo de transferencia ocurre en sistemas que tienen moléculas sólidas, líquidas o gaseosas y en los que existe un gradiente de temperatura (Welty et al., 1999). El segundo mecanismo de transferencia de calor por conducción es por electrones libres, principalmente en sólidos metálicos puros. La concentración de electrones libres varía considerablemente para las aleaciones metálicas y es muy baja para los no metales (Welty et al., 1999). La capacidad de los sólidos para conducir el calor varía directamente con la concentración de electrones libres; en consecuencia, se espera que los metales puros sean mejores conductores del calor, hecho confirmado por la experiencia y demostrado en esta práctica virtual.

#### Experimental

El experimento de conducción de calor consistió en medir la evolución temporal de la temperatura en una barra de aluminio (6 cm x 0.5 cm) cuyos extremos están en contacto térmico con dos cuerpos de calor a diferente temperatura. Los cuerpos de baja temperatura consistieron en un bloque de acero (2 cm x 4 cm) a temperatura ambiente (18 °C). Por otro lado, el cuerpo de alta temperatura consistió en un bloque de cobre (2 cm x 4 cm) calentado por una fuente externa que permite mantener una temperatura de 350 °C. Además, se colocan cinco sensores de temperatura en la barra de aluminio a distancias iguales. La barra está aislada del entorno del laboratorio utilizando fibra de vidrio para reducir la pérdida de calor por radiación y convección de aire. Inicialmente, la barra de aluminio está a una temperatura ambiente uniforme.

Usando el software Energy2D, se le pide al estudiante que obtenga lo siguiente:

1. El diagrama que representa el montaje experimental.
2. La simulación del proceso hasta alcanzar el estado estacionario.
3. Un gráfico que muestra los valores numéricos del sensor (temperatura) en diferentes posiciones de la barra como una función de tiempo hasta alcanzar el estado estacionario.
4. Un gráfico que muestra la posición del sensor frente a la temperatura registrada en 4 intervalos de tiempo diferentes hasta alcanzar el estado estable.
5. Describe y comenta cada una de las parcelas.

#### Discusión

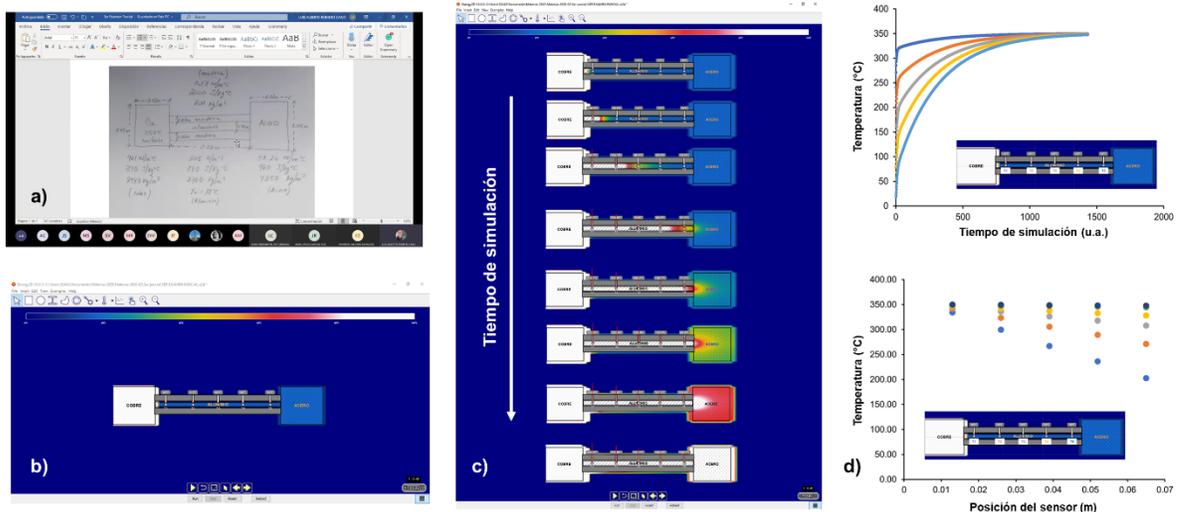
La primera actividad fue realizada sincrónicamente por el profesor (Figura 2a), en la que se resuelve el ejercicio de forma tradicional utilizando lápiz y papel. Con los conceptos básicos de aplicación de la Ley de Fourier (Joseph Fourier & Freeman, 1878) fue posible comprender y comprender el ejercicio. Mediante esta interpretación, el alumno no ha observado el fenómeno de la conducción de calor, y solo obtiene una solución numérica para el estado estacionario. Por otro lado, al realizar la simulación del software, la interacción del alumno con un entorno didáctico le permite comprender

el fenómeno físico. Mediante bloques y cuadros de texto, el alumno puede reproducir los bocetos dibujados en la pizarra de Microsoft Teams. La configuración de bloques se ha realizado introduciendo la temperatura y las propiedades físicas de los materiales, que pueden consultarse en los apéndices de los libros de texto de transferencia de calor (Wety et al., 1999) (Figura 2b). Una vez completada la configuración, es posible iniciar la simulación (Figura 2c). Dentro del software, al utilizar una paleta de colores, es posible observar la transferencia de calor de un cuerpo caliente a uno frío; también es posible apreciar un equilibrio térmico ya que todos los cuerpos involucrados alcanzan la misma temperatura, representada en blanco (ver video 2 – Tabla 2). Es importante señalar que el software reduce o acelera el tiempo de simulación para observar el fenómeno en detalle. Los datos registrados por los sensores de temperatura se pueden exportar a una hoja de cálculo de Microsoft Excel, y se puede realizar un tratamiento numérico para obtener la solución al problema (Figura 3d). A través de esta representación, es posible observar un perfil de temperatura lineal que confirma que el gradiente de temperatura es proporcional a la posición de los sensores, como lo indica la Ley de Fourier (Banderas, 1988) para la transferencia de calor por conducción, ecuación 1.

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{1}$$

Donde  $\dot{Q}_x$  es el calor transferido en la dirección x de una superficie caliente a una fría; k es la conductividad térmica del material; A es el área de la sección transversal; DT es la diferencia entre la temperatura de un cuerpo caliente y un cuerpo frío, y Dx es la separación entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío.

El taller se puede reproducir utilizando diferentes materiales en la placa que une los depósitos. El alumno puede proponer materiales aislantes y buenos conductores térmicos y comprender visualmente el fenómeno, fomentando el pensamiento crítico.



**Figura 2.** Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por conducción: a) Captura de pantalla de la sesión sincrónica, b) Captura de pantalla de la construcción de la práctica dentro del software Energy2D, c) Simulación del fenómeno de conducción de calor, d) Representación matemática obtenido a partir del fenómeno de conducción de calor.

### 3.2.2 Segundo Taller Práctica Virtual: Transferencia de calor por convección natural

#### Conceptos básicos

La convección natural es un mecanismo de transporte de calor en el que el movimiento del fluido no es generado por una fuente externa. En cambio, el movimiento del fluido es causado por la flotabilidad, la diferencia en la densidad del fluido se produce debido a los gradientes de temperatura.

Recientemente, la convección natural ha atraído la atención de muchos investigadores debido a sus amplias aplicaciones tanto en la naturaleza como en la tecnología de la ingeniería (Zheng & Zhang, 2017).

### Experimental

El experimento de convección de calor natural consistió en determinar el coeficiente de convección en el proceso de enfriamiento natural de una barra. El fluido (propiedades: conductividad = 0.025 W/m°C; calor específico = 1012 J/kg°C; densidad = 1,20 kg/m<sup>3</sup>; viscosidad cinemática = 0.00001568 m<sup>2</sup>/s) se programa inicialmente a 18 °C y entra en contacto con una placa de un material "x" (propiedades: conductividad = 1 W/m°C; calor específico = 1000 J/kg°C; densidad = 25 kg/m<sup>3</sup>; dimensiones = 3.2 m x 0.4 m) que se encuentra inicialmente a 100° C. Nota: Defina un área de estudio de 3.2 m x 4 m. Los aislantes térmicos se recomiendan para eso (Propiedades: conductividad térmica = 0 W/m°C; calor específico = 1000 J/kg°C; densidad = 25 kg/m<sup>3</sup>).

Usando el software Energy2D, se le pidió al estudiante que obtuviera lo siguiente:

1. El diagrama que representa el montaje experimental.
2. La simulación del proceso hasta alcanzar el equilibrio térmico.
3. Hacer las parcelas:
  - Temperatura superficial y flujo de calor en función del tiempo.
  - Temperatura superficial frente a flujo de calor.
4. El coeficiente de película utilizando las gráficas anteriores.

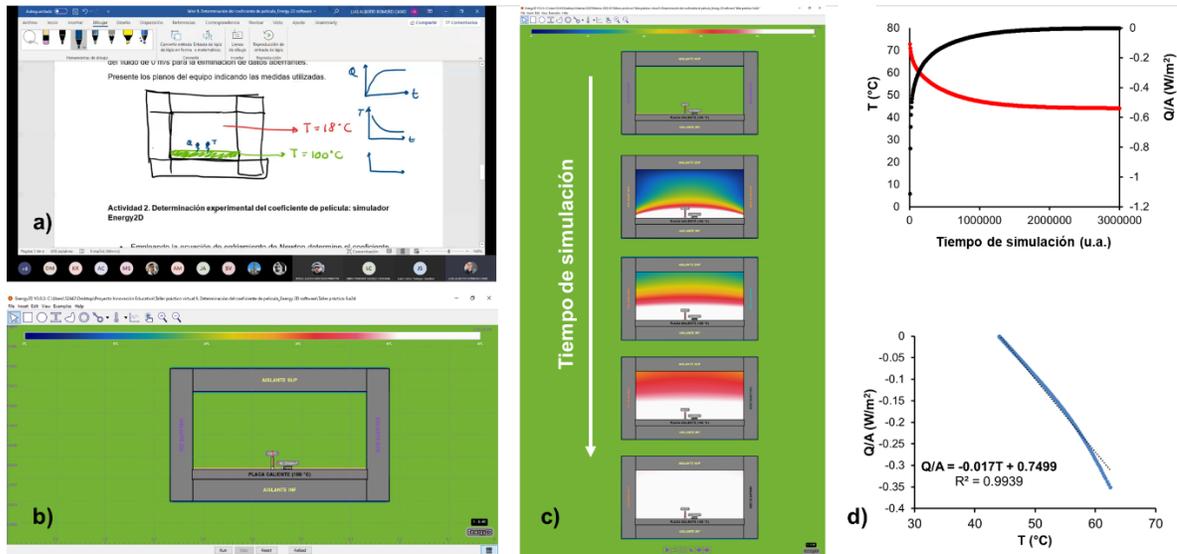
### Discusión

De manera similar al taller anterior, a través de una actividad síncrona, se definieron los diagramas de ejercicios (Figura 3a), y después se reprodujeron exitosamente en el software Energy2D mediante bloques (Figura 3b). Al iniciar la simulación (Figura 3c), fue posible apreciar el enfriamiento de la barra utilizando la paleta de colores (ver video 3 –Tabla 2). El fenómeno anterior se representó gráficamente (Figura 3d, arriba) exportando los datos obtenidos durante la simulación, mostrando una tendencia exponencial de la temperatura del fluido hasta alcanzar un perfil estacionario. Estos mismos datos se organizaron en una segunda gráfica (Figura 3d, abajo) para representar la ecuación 2 de la Ley de Enfriamiento de Newton (Davidzon, 2012), y de ella obtener el coeficiente convectivo (0.017 W/m<sup>2</sup> °C).

$$\dot{Q} = hA\Delta T \quad (2)$$

Donde  $\dot{Q}$  corresponde al calor transferido desde la superficie de un sólido a un fluido en movimiento; h es el coeficiente convectivo de la superficie del fluido; y DT es la diferencia entre la temperatura de la superficie (Ts) y la temperatura del fluido (T).

Es fundamental destacar que la solución de este taller se ha llevado a cabo eliminando los efectos de bucles convectivos durante la simulación (caja convectiva en las propiedades). Durante la ejecución del taller, se recomendó a los alumnos la realización del ejercicio considerando ambos casos. Con esta estrategia fue posible discutir el efecto del cambio de densidad en el fluido debido al cambio de temperatura, que provoca su movimiento.



**Figura 3.** Diseño de práctica virtual de transferencia de calor por convección: a) Captura de pantalla de sesión síncrona, b) Captura de pantalla de la construcción de la práctica dentro del software Energy2D, c) Simulación del fenómeno de convección de calor, d) Representación matemática obtenido a partir del fenómeno de convección de calor.

### 3.2.3 Tercer Taller de Práctica Virtual: Estimación de constantes de Stefan-Boltzmann por radiación térmica

#### Conceptos básicos

El conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por un cuerpo, a una temperatura superior al cero absoluto, se conoce como radiación térmica. A temperaturas inferiores a 600 °C, la radiación térmica emitida por un cuerpo negro (un emisor/receptor perfecto definido en los párrafos siguientes) no es visible ya que la energía radiada tiene una distribución espectral centrada en la región infrarroja del espectro electromagnético. A medida que el cuerpo se calienta, la distribución anterior cambia a longitudes de onda más cortas. Entre 600 y 700 °C, se emite suficiente energía dentro del espectro visible para que el cuerpo brille de color rojo oscuro. A temperaturas aún más altas, el cuerpo se vuelve rojo brillante e incluso "blanco-rojo", como el filamento de una bombilla (Simone Fohrmann et al., 2015).

Podemos resumir la teoría de la radiación en tres leyes principales: i) La ley de Wien, que establece que el poder emisor espectral depende de la longitud de onda pero se desplaza a diferentes temperaturas, ii) La distribución de Planck, que define la distribución de intensidad espectral de un negro cuerpo y considera la naturaleza discreta de la energía (cuanta), y iii) La ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 3), que establece que el poder emisor es proporcional a  $T^4$ , siendo T la temperatura absoluta, que se deriva de la integración de la distribución de Planck a lo largo de todas las longitudes de onda, lo que resulta en la naturaleza continua de la emisión de cuerpo negro (Kirchhoff, 1860).

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (3)$$

Donde  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  es la constante de Stefan-Boltzmann (una constante fundamental), T es la temperatura absoluta, A es el área en unidades propias y  $\varepsilon$  es la emisividad del cuerpo. La emisividad es una medida a la cual un cuerpo puede absorber radiación térmica, y se puede definir de acuerdo con la Ecuación 4:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{ideal}} \in (0,1) \quad (4)$$

Donde  $\dot{Q}_{ideal}$  es el calor absorbido por un cuerpo negro; un objeto ideal capaz de absorber toda la radiación térmica y transformarla en energía interna. Esta definición no está relacionada con el color del objeto. Cuanto más cerca está la emisividad de la unidad, más energía térmica irradia/absorbe, y cuanto más cerca está de cero (una característica de los materiales brillantes), menos energía irradia/absorbe. Cuando dos objetos interactúan entre sí, la tasa neta de transferencia de calor viene dada por la Ecuación 5:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_{surr}^4 - T_{obj}^4) \quad (5)$$

Siendo  $T_{obj}$  la temperatura absoluta del cuerpo receptor de la radiación del entorno a una temperatura  $T_{surr}$ , denominado “cuerpo emisor”. Es importante destacar que cuando las ondas electromagnéticas inciden en la superficie de un cuerpo, parte de esa energía electromagnética se transforma en energía interna en función de su capacidad de absorción de radiación térmica. Se absorbe una fracción de radiación,  $\alpha$ , parte se refleja con fracción  $\rho$ , y parte se transmite con fracción  $\tau$ , tal que  $\alpha + \rho + \tau = 1$  (propiedades ópticas adimensionales).

#### Experimental

El experimento de radiación de calor consistió en determinar el valor de la constante de Stefan-Boltzmann a partir de la construcción de un experimento que involucra un cuerpo emisor y un cuerpo receptor. Los siguientes supuestos se consideraron para simplificar el experimento y deben recordarse en los párrafos siguientes (Bergman et al., 2020; Flynn et al., 2019):

- Los objetos bajo estudio son opacos, tales que  $\tau \approx 0$ , entonces  $\alpha + \rho = 1$ .
- Las dimensiones relativas de los cuerpos son tales que un cuerpo puede tratarse como un entorno con un cuerpo mucho más pequeño en el interior. El cuerpo pequeño tiene poco efecto sobre el campo general y  $\alpha = \varepsilon$ .
- La radiación térmica que recibe un objeto depende de su orientación, geometría y la distancia que lo separa de las fuentes de radiación. Con el supuesto anterior no es necesario introducir una corrección del factor de visualización.
- Las propiedades ópticas no son una función de la longitud de onda.

Para el experimento de transferencia de calor, se consideraron dos objetos que interactúan: un objeto lo suficientemente grande como para actuar como un cuerpo circundante o emisor a temperatura constante, y un objeto pequeño o cuerpo receptor, ambos encerrados por un límite con propiedades reflectantes. Se consideraron las siguientes propiedades físicas de los objetos que interactúan:

- Propiedades del recinto: absorptividad = 0.5, reflectividad = 0.5 y emisividad = 1. Este recinto consta de dos paredes verticales de 0.1 m de ancho por 0.75 de alto y dos paredes horizontales de 1.22 m de ancho por 0.10 m de alto que actúan como una caja para reflejar la Radiación termal.
- Propiedades del cuerpo emisor: absorptividad = 0, reflectividad = 1 y emisividad = 1. Dimensiones: 1.15 m de ancho por 0.1 m de alto.
- Propiedades del cuerpo receptor: absorptividad = 0,85, reflectividad = 0.15 y emisividad = 0.85, ancho = 0.06 m y altura = 0.01 m. Conductividad térmica = 350 W/(m °C), calor específico = 400 W/(kg °C) y densidad = 8960 kg/m<sup>3</sup>.

Además, se consideró lo siguiente: i) Las propiedades convectivas del fondo se desactivaron, y ii) El objeto más pequeño estuvo centrado con el objeto más grande y se mantuvo al menos a 0.30 m de él para que el factor de visualización fuera más cercano a la unidad.

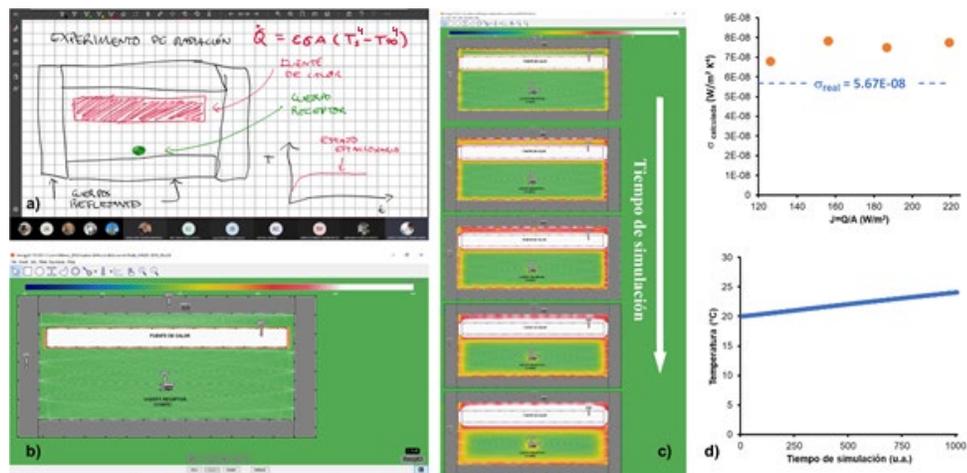
De manera similar a los experimentos virtuales anteriores, los estudiantes completaron las siguientes tareas:

1. Dibujaron un boceto representativo del experimento y colocaron los sensores de temperatura en cualquier lugar dentro de los objetos.
2. Midieron el flujo y la temperatura en estado estacionario en el objeto pequeño, obtenidos después de aprox. 105 minutos en el simulador (Nota: se puede lograr más rápido aumentando el tamaño del paso). Las siguientes temperaturas constantes se utilizaron para el cuerpo más grande para obtener la constante de Stefan-Boltzmann: 45, 50, 55 y 60 °C.
3. La constante de Stefan-Boltzmann se calculó como  $\sigma = J/\varepsilon(T_{surr}^4 - T_{obj}^4)$  con  $J = \dot{Q}/A$  como flujo o potencia emisiva.
4. Se comparó el valor real  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  con el calculado en cada experimento virtual.

### Discusión

Durante una sesión sincrónica, se mostró un boceto que representó el experimento con instrucciones verbales y escritas (ver Figura 4a). Luego, los estudiantes reprodujeron el boceto utilizando las opciones de dibujo en Energy2D (Figura 2b), asegurándose de que sus bocetos cumplieran con los requisitos cualitativos de las dimensiones relativas entre los objetos y que los sensores de temperatura y flujo estuvieran colocados correctamente. En la Figura 4c se observa cómo se alcanzó el estado estacionario en el entorno virtual. En la Figura 4d se observan los resultados de la constante de Stefan-Boltzmann para las diferentes temperaturas del cuerpo grande comparadas con el valor real. Tenga en cuenta que hay una pequeña imprecisión debido al factor de visualización. En la Figura 4e se ve la evolución de la temperatura con respecto al tiempo, notando que este experimento tuvo una dinámica más lenta en comparación con otros mecanismos de transferencia de calor con diferencias de temperatura similares.

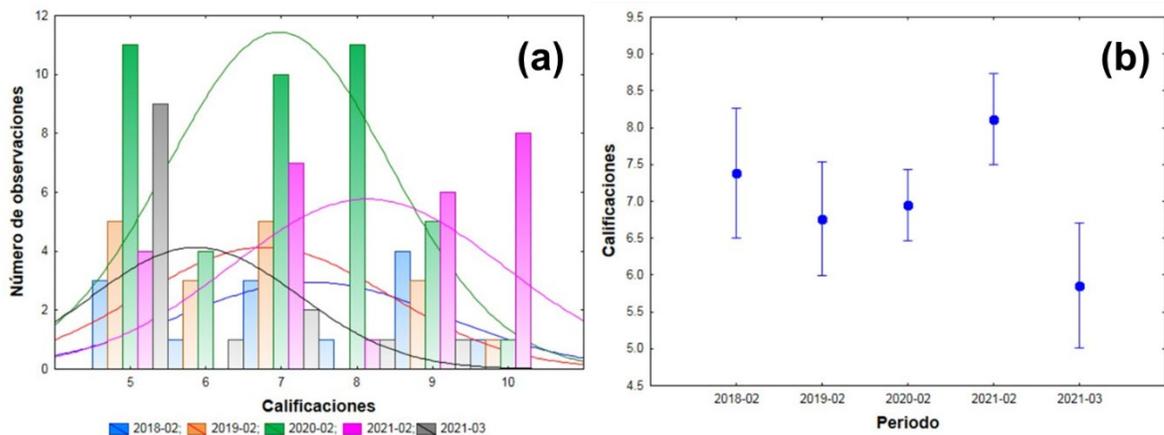
La radiación térmica se volvió más relevante a altas temperaturas, sin embargo, el gradiente definido para este experimento fue pequeño y se puede reproducir de forma segura en un laboratorio en una configuración real.



**Figura 4.** Diseño del experimento del laboratorio virtual. a) Captura de pantalla de una sesión sincrónica, b) captura de pantalla de la configuración del experimento de laboratorio utilizando el software Energy2D, c) Simulación del fenómeno de transferencia de calor por radiación, d) Representación matemática obtenida del fenómeno de transferencia de calor.

### 3.3 Validación estadística de la hipótesis del trabajo de investigación.

La Figura 5 muestra la distribución de calificaciones obtenidas para los estudiantes en los periodos 2018, 2019, 2020 y 2021, así como un análisis ANOVA para evaluar diferencias estadísticamente significativas entre grupos (periodos) con un nivel de confianza de 0.95. En la Figura 5a se observa que los promedios obtenidos son: Periodo 2018-02 =  $7.38 \pm 1.75$ , Periodo 2019-02 =  $6.76 \pm 1.64$ , Periodo 2020-02 =  $6.95 \pm 1.46$ , Periodo 2021-02 =  $8.11 \pm 1.79$  y Periodo 2021-03 =  $5.85 \pm 1.35$ . A partir de la información anterior se realizó un análisis ANOVA de una vía (Figura 5b) obteniendo como resultado:  $F(2, 79) = 10.118$ ;  $p = 0.00012$ ; por la razón es posible concluir que no existen diferencias estadísticamente significativas entre periodos. La información anterior evidencia que la implementación de entornos virtuales de aprendizaje en asignaturas con laboratorio pertenecientes al Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología de la UAG (caso de estudio: Fenómenos de Transporte) permitió mantener operando los servicios educativos curriculares (Caso de estudio: Ingeniería Química, Ingeniería en Biotecnología e Ingeniería en Alimentos) durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2 (caso de estudio: Periodos 2020 y 2021) sin presentar alteraciones estadísticamente significativas con respecto a los dos años anteriores.



**Figura 5.** Evaluación estadística de la implementación de EVAs en la asignatura de Fenómenos de Transporte como estrategia para mantener operando los servicios educativos curriculares durante la crisis ocasionada por la pandemia de SARS-CoV-2: (a) Distribución de calificaciones y (b) Análisis ANOVA de una vía (las barras verticales denotan un nivel de confianza de 0.95)

## 4. Conclusiones

La integración y uso de un Entorno Virtual de Aprendizaje para estudiantes de ingeniería en los cursos de Transferencia de Calor y Fenómenos de Transporte permitió reproducir virtualmente las prácticas de laboratorio durante las restricciones escolares por el confinamiento exigido por la pandemia del COVID-19. La estrategia didáctica implementada fortaleció los recursos académicos, tecnológicos y didácticos de la UAG, brindando herramientas que permitieron implementar el modelo Blended learning (B-Learning) dentro de la universidad como estrategia para adecuar la metodología de enseñanza-aprendizaje a los desafíos actuales. Este modelo de enseñanza permitirá combinar diferentes espacios de aprendizaje en actividades presenciales y virtuales.

Las limitaciones del diseño del entorno virtual propuesto corresponden a: (a) la falta de conectividad o la conexión intermitente resulta perjudicial ya que evita la continuidad de las clases y, por tanto, retrasa el desarrollo educativo de los estudiantes. (b) la falta de interacción presencial con otros compañeros produce aislamiento en cualquier estudiante en línea. Para intentar solventarlo, se propone la interacción con compañeros y profesores a través de recursos como: mensajes online, correo electrónico, participación en foros y videollamadas. (c) la ejecución del curso online puede provocar problemas de salud, tales como dolor en la espalda y hombros. La solución más factible es brindar cursos flexibles que permitan darle más tiempo libre a los estudiantes para descansar durante

el proceso.

Finalmente, es importante señalar que las principales contribuciones de este trabajo al estado del arte de la ciencia, tecnología o qué hacer educativo son: (a) Investigación en innovación educativa aplicado en estrategias educativas hacia el aprendizaje activo. (b) Aplicación de herramientas digitales y software de acceso gratuito para el fortalecimiento profesional de estudiantes en formación del área de Ingeniería. (c) Fortalecimiento del programa B-Learning de la Universidad Autónoma de Guadalajara.

### Financiamiento y/o Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología y el Departamento de Biotecnológicas y Ambientales de la Universidad Autónoma de Guadalajara para la realización de este proyecto. También agradecemos a la Dra. Ana I. Zárate-Guzmán por sus valiosos comentarios durante el desarrollo de este proyecto. W.M.W-V, J.E.C.P-G y S.D.S-V agradecen a la Universidad Autónoma de Guadalajara por la beca recibida para completar sus estudios de pregrado.

### Referencias

- Alanís Navarro, J. A., Castillo Téllez, M., Rivera Martínez, M. A., Pedroza Silvar, G., & Martínez Tejada, F. C. (2019). Computational thermal analysis of a double slope solar still using Energy2D. *Desalination and Water Treatment*, 151, 26–33. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23811>
- Araújo, F. J. de O., de Lima, L. S. A., Cidade, P. I. M., Nobre, C. B., & Neto, M. L. R. (2020). Impact Of Sars-Cov-2 And Its Reverberation In Global Higher Education And Mental Health. *Psychiatry Research*, 288, 112977. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2020.112977>
- Arneson, J. B., & Offerdahl, E. G. (2018). Visual literacy in Bloom: Using Bloom's Taxonomy to Support Visual Learning Skills. *CBE Life Sciences Education*, 17(1), 1–8. <https://doi.org/10.1187/cbe.17-08-0178>
- Assunção Flores, M., & Gago, M. (2020). Teacher education in times of COVID-19 pandemic in Portugal: national, institutional and pedagogical responses. *Journal of Education for Teaching*, 46(4), 507–516. <https://doi.org/10.1080/02607476.2020.1799709>
- Banderas, A. V. (1988). *Problemas de Transferencia de Calor* (Primera). Limusa.
- Bawa, P. (2020). Learning in the age of SARS-COV-2: A quantitative study of learners' performance in the age of emergency remote teaching. *Computers and Education Open*, 1, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2020.100016>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2020). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Eighth). Wiley.
- Bossard, C., Kermarrec, G., Buche, C., & Tisseau, J. (2008). Transfer of learning in virtual environments: A new challenge? *Virtual Reality*, 12(3), 151–161. <https://doi.org/10.1007/s10055-008-0093-y>
- Chou, S. W., & Liu, C. H. (2005). Learning effectiveness in a Web-based virtual learning environment: a learner control perspective. *Journal of Computer Assisted Learning*, 21(1), 65–76. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2005.00114.x>
- Davidovitch, L., Parush, A., & Shtub, A. (2006). Simulation-based Learning in Engineering Education: Performance and Transfer in Learning Project Management. *Journal of Engineering Education*, 95(4), 289–299. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00904.x>
- Davidzon, M. I. (2012). Newton's law of cooling and its interpretation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22), 5397–5402. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.035>
- Davis, K., Christodoulou, J., Seider, S., & Gardner, H. (2011). *The Theory of Multiple Intelligences*.

- In Handbook of Educational Ideas and Practices (pp. 485–503). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511977244.025>
- Fang, N. (2012). Using Computer Simulation and Animation to Improve Student Learning of Engineering Dynamics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 56, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.682>
- Flynn, A. M., Akashige, T., & Theodore, L. (2019). *Kern's Process Heat Transfer (Second)*. John Wiley & Sons.
- Fraser, D. M., Pillay, R., Tjatindi, L., & Case, J. M. (2007). Enhancing the Learning of Fluid Mechanics Using Computer Simulations. *Journal of Engineering Education*, 96(4), 381–388. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2007.tb00946.x>
- Fu, T. T. (2003). Applications of computer simulation in mechanism teaching. *Computer Applications in Engineering Education*, 11(3), 156–165. <https://doi.org/10.1002/cae.10043>
- García-Alberti, M., Suárez, F., Chiyón, I., & Mosquera Feijoo, J. C. (2021). Challenges and Experiences of Online Evaluation in Courses of Civil Engineering during the Lockdown Learning Due to the COVID-19 Pandemic. *Education Sciences*, 11(59). <https://doi.org/10.3390/educsci11020059>
- Gillet, D., Latchman, H., Salzmman, C., & Crisalle, O. (2001). Hands-On Laboratory Experiments in Flexible and Distance Learning. *Journal of Engineering Education*, 90(2), 187–191. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2001.tb00589.x>
- Horton, W. (2000). *Designing Web-based training: how to teach anyone anything anywhere anytime*. Wiley.
- Johnson-Glauch, N., Choi, D. S., & Herman, G. (2020). How engineering students use domain knowledge when problem-solving using different visual representations. *Journal of Engineering Education*, 109(3), 443–469. <https://doi.org/10.1002/jee.20348>
- Joseph Fourier, J. B., & Freeman, A. (1878). *THE ANALYTICAL THEORY OF HEAT (First)*. Cambridge University Press.
- Kirchhoff, G. (1860). I. On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 20(130), 1–21.
- Koh, C., Tan, H. S., Tan, K. C., Fang, L., Fong, F. M., Kan, D., Lin Lye, S., & Lin Wee, M. (2010). Investigating the Effect of 3D Simulation-Based Learning on the Motivation and Performance of Engineering Students. *Journal of Engineering Education*, 99(3), 237–251. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2010.tb01059.x>
- Kozaris, I. A. (2010). Platforms for e-learning. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397, 893–898. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-3587-x>
- Lapitan Jr., L. D., Tiangco, C. E., Sumalinog G., D. A., Sabarillo, N. S., & Diaz, J. M. (2021). An effective blended online teaching and learning strategy during the COVID-19 pandemic. *Education for Chemical Engineers*, 35, 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.012>
- Malgieri, M., & Onorato, P. (2020). Teaching the heat transfer law using a stochastic toy model. *European Journal of Physics*, 41(1). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab3746>
- Ozadowicz, A. (2020). Modified Blended Learning in Engineering Higher Education during the COVID-19 Lockdown — Building Automation Courses Case Study. *Education Sciences*, 10(10), 292. <https://doi.org/doi:10.3390/educsci10100292>
- Prince, M., & Felder, R. (2006). Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123–138. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>
- Rodríguez, R. R., & Niño, Z. (2016). Evaluación de Herramientas Computacionales Gratuitas para la Simulación de Procesos de Combustión en Motores de Encendido por Chispa. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 977–984.

- Simone Fohrmann, L., Yu. Petrov, A., Lang, S., Jalas, D., F. Krauss, T., & Eich, M. (2015). Single mode thermal emission. *Optics Express*, 23(21), 27672–27682. <https://doi.org/10.1364/OE.23.027672>
- Sutjahja, I. M., Assegaf, S., & Wonorahardjo, S. (2020). Digital Simulation as Learning Aid for Heat Flow in Solid Theoretical Understanding. *Journal of Physical Science and Engineering*, 5(1), 11–21. <https://doi.org/10.17977/um024v5i12020p011>
- Viner, R. M., Russell, S. J., Croker, H., Packer, J., Ward, J., Stansfield, C., Mytton, O., Bonell, C., & Booy, R. (2020). School closure and management practices during coronavirus outbreaks including COVID-19: a rapid systematic review. *The Lancet Child and Adolescent Health*, 4(5), 397–404. [https://doi.org/10.1016/S2352-4642\(20\)30095-X](https://doi.org/10.1016/S2352-4642(20)30095-X)
- Vlachos, J., Hertegård, E., & Svaleryd, H. B. (2021). The effects of school closures on SARS-CoV-2 among parents and teachers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(9), 1–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020834118>
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., & Franchini, C. S. (1999). *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Limusa.
- Xie, C. (2012). Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone. *The Physics Teacher*, 50(4), 237–240. <https://doi.org/10.1119/1.3694080>
- Zapata-Garibay, R., Gonzalez-Fagoaga, J. E., Meza-Rodriguez, E. B., Salazar-Ramirez, E., Plascencia-Lopez, I., & Gonzalez-Fagoaga, C. J. (2021). Mexico's Higher Education Students' Experience During the Lockdown due to the COVID-19 Pandemic. *Frontiers in Education*, 6. <https://doi.org/10.3389/educ.2021.683222>
- Zheng, L., & Zhang, X. (2017). Numerical Methods. In Liancun Zheng & X. Zhang (Eds.), *Modeling and Analysis of Modern Fluid Problems* (First, pp. 361–455). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811753-8.00008-6>



Sin embargo, para mantener el estilo de vida que hemos llevado hasta ahora es necesario encontrar nuevas alternativas que nos permitan, en términos prácticos, obtener más producto con menos contaminación y menos recursos.

Las últimas décadas del siglo veinte y los primeros años del siglo veintiuno han demostrado que el modelo dominante del desarrollo global es prácticamente insostenible (Comisión Económica para América Latina [CEPAL], 2016). Debido a esto ha surgido un mayor interés por encontrar nuevas alternativas tecnológicas que sean capaces de mejorar los procesos convencionales, y que logren satisfacer las necesidades económicas, sociales y ambientales. Un ejemplo de proceso convencional es la destilación, la cual a pesar de ser una de las principales operaciones de separación dentro de la industria química, requiere una gran cantidad de energía para su funcionamiento. Por lo anterior, surge la destilación reactiva como alternativa para llevar a cabo procesos más sostenibles, rápidos y eficaces; obteniendo productos más limpios con un mínimo impacto ambiental y que conducen a mayores derramadas económicas.

Se le conoce como destilación reactiva (DR) al proceso en el que las etapas principales de la destilación (reacción química y separación) se llevan a cabo simultáneamente dentro de un mismo aparato (Sakhre, 2019). Esto conlleva diferentes ventajas como: eliminar la limitación debido al equilibrio químico en la reacción; selectividades altas; se evita el uso de solventes en el proceso de extracción; separa mezclas azeotrópicas y de componentes con puntos de ebullición parecidos con mayor facilidad (Del Río Segovia, 2016). En consecuencia, operar con columnas de destilación reactiva genera un impacto ambiental menor en comparación con las columnas de destilación convencionales, aquellas donde las etapas principales se llevan a cabo por separado en aparatos diferentes, además proporciona un ahorro de recursos energéticos y de materia prima considerables; es por ello que desde el siglo pasado esta tecnología ha sido de interés para los investigadores y los industriales.

La primera patente del proceso de DR se realizó en la década de 1920, pero fue en 1980 que la Eastman Company logró sintetizar acetato de metilo usando DR por primera vez. Después del éxito alcanzado por la compañía, varios países y universidades europeas se unieron para trabajar en una estrategia de desarrollo para el proceso de destilación reactiva bajo el nombre de “the umbrella of brite Euran Project” (Sakhre, 2019). El presente trabajo tiene como objetivo explicar las ventajas del proceso de destilación reactiva en su implementación como alternativa a los procesos convencionales. Así pues, abordaremos más a fondo las razones por las cuales las columnas de destilación reactiva son tan convenientes, considerando parámetros como su funcionamiento, sus aportaciones al ahorro energético, económico y otros factores externos.

## 2. Desarrollo

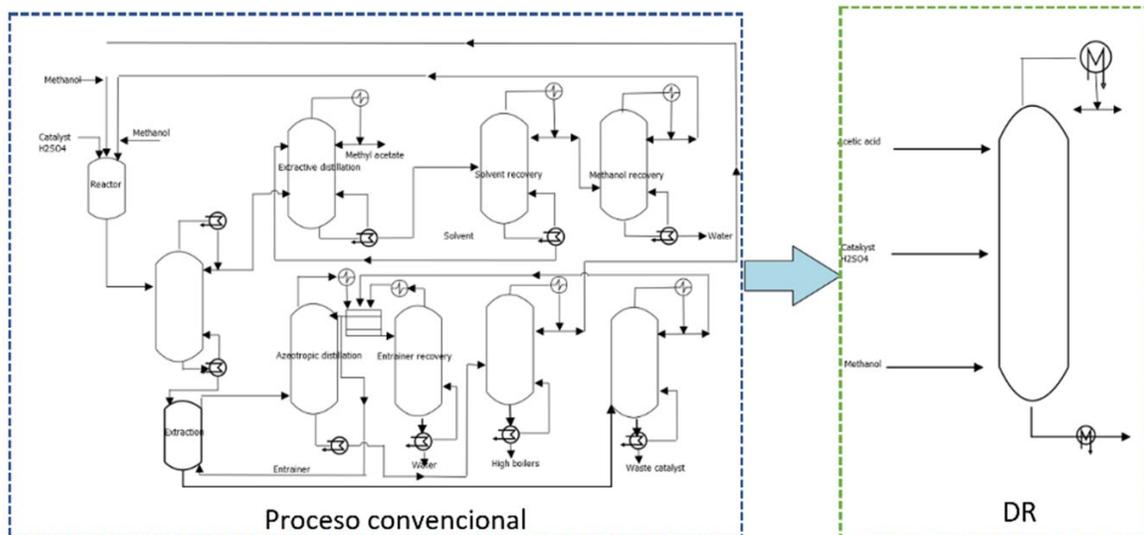
La destilación convencional es un proceso muy antiguo que permite separar las sustancias de una mezcla líquida. Al calentar el líquido, sus constituyentes se vaporizan de acuerdo con sus respectivas temperaturas de ebullición; un condensador permite enfriar estos vapores para recuperar las sustancias respectivas en recipientes adecuados (Green y Southard, 2019). En la industria química, cuando se lleva a cabo este proceso las reacciones químicas y la separación de los productos se efectúan de forma secuencial; frecuentemente esto implica un alto costo, debido a que se desperdician grandes cantidades de energía (Medina-Leaños, Segovia-Hernández y Félix-Flores, 2011). El costo de operación de las columnas de destilación convencional es, por lo general, la parte más costosa de la mayoría de los procesos industriales en los que participa (Hernández Hernández, 2016).

Además de su elevado costo de operación, las columnas de destilación convencionales pueden presentar una gran cantidad de impurezas en el producto final. También impactan directamente al medio ambiente, puesto que la quema de combustibles fósiles para llevar a cabo el proceso de separación produce grandes emisiones de carbono (Gutiérrez-Guerra, Segovia-Hernández y

Hernández, 2009). Estos problemas pueden disminuirse de manera importante con la implementación de la destilación reactiva (DR); que como ya se mencionó es la ejecución simultánea de reacción y separación en un mismo equipo y se emplea para reacciones en fase líquida. La aplicación de la DR puede aportar ahorros de hasta el 80% de los costos de energía final de capital asociados con la reacción convencional de separación, por lo cual, esta tecnología ocupa un lugar excepcional en la intensificación de procesos químicos; además, tiene un amplio ámbito de aplicación como método de separación (Keller, 2014).

La DR se ha utilizado e investigado con éxito en el pasado para varias reacciones como eterificación, esterificación, hidrogenación, hidrodesulfuración y polimerización. Una de las primeras patentes en este campo fue la aplicación de la esterificación catalizada homogéneamente, la cual se remontan a la década de 1920 (Harmsen, 2007). Por otro lado, es importante resaltar que en los últimos años han aparecido un número creciente de artículos acerca de la DR; esto revela claramente el creciente interés en esta área. Estas investigaciones han permitido el surgimiento de nuevas empresas dedicadas al desarrollo e implementación de tecnologías de destilación reactiva; un ejemplo claro es la empresa CDTECH, la cual hizo su primera implementación comercial en una planta de éter metil tert-butílico (MTBE) en Charter Oil, Houston, Texas en 1981, como se mencionó antes. Desde entonces, ellos han implementado 123 unidades comerciales (Ng, 2006). Otro claro ejemplo es Chemoxy International en Reino Unido la cual comercializa, entre otros, columnas de destilación reactiva (Chemoxy, 2020).

En la Figura 1, se muestra un esquema del proceso convencional de síntesis de acetato de metilo que consiste en ocho columnas de destilación debido a la presencia de dos azeótropos entre el acetato de metilo y el metanol y entre el acetato de metilo y el agua. La compañía Eastman-Kodak desarrolló un proceso de destilación reactiva en el que sólo se necesita una columna para producir acetato de metilo de alta pureza. Además, la columna de destilación reactiva única consumía cinco veces menos energía y tenía cinco veces menos costos de inversión de capital que el proceso convencional de unidades múltiples (Keller, 2014). En el acetato de metilo producido por la compañía Eastman-Kodak, el proceso de los flujos de reactivos se controlan exactamente en estequiometría. Si esto no se controla con precisión, el metanol contaminaría el producto o el ácido acético contaminaría el agua de coproducto. El proceso no tiene capacidad de respaldo para recuperarse de este tipo de errores (Sakhre, 2019).



**Figura 1.** Procesos convencionales (izquierda) e intensificado (derecha) de síntesis de acetato de metilo. El proceso convencional consiste en un reactor seguido de ocho columnas de destilación y una de extracción. El proceso intensificado (Eastman-Kodak) usa tecnología de destilación reactiva. Adaptado de Keller (2014).

Las principales investigaciones sobre el proceso de DR se han enfocado en los aspectos teóricos, la mejora del rendimiento en las aplicaciones existentes y la exploración de nuevas aplicaciones (Harmsen, 2007). Particularmente, se investiga ampliamente la integración de las reacciones químicas con la separación física en una sola unidad, característica inherente de este tipo de procesos; lo cual conduce normalmente a una reducción considerable en la inversión de capital y en los costos de operación (Sakhre, 2019). Dicho beneficio económico puede ser causado por la reducción de la materia prima utilizada, la disminución de las corrientes de reciclo y la reducción de los costos de las bombas, tuberías e instrumentación (Medina-Leaños, Segovia-Hernández, y Félix-Flores, 2011). Aunque, por otra parte, la destilación reactiva se ve limitada a sistemas en donde las volatilidades relativas entre los reactantes y los productos coinciden, de tal forma que los productos puedan ser fácilmente removidos de la región donde se está llevando a cabo la reacción, evitando pérdidas de reactantes (Hernández Hernández, 2016). Asimismo, es aplicable a mezclas multicomponentes y multirreactivas, mezclas altamente no ideales como las azeotrópicas y con solubilidad limitada. Por otro lado, si la DR se aplica a la reacción exotérmica, el calor de la reacción puede utilizarse para la vaporización del líquido; esto conduce a un ahorro de los costos de energía por la reducción de los trabajos de calderas (Tuchlenski et al., 2001).

Otras de las ventajas de este tipo de operación unitaria es que necesita pocos datos iniciales en el modelado del equilibrio fisicoquímico, y puede ser fácilmente formalizado como algoritmo reduciendo así el tiempo computacional y simplificando laboriosos y extensos experimentos a gran escala (Keller, 2014). De igual forma, esta tecnología requiere menores medidas de precaución y, además, presenta a menudo mayor confiabilidad del sistema debido a la reducción de equipos y conexiones; esto a su vez generará una disminución en las emisiones de gases como el dióxido de carbono y un ahorro energético (Sakhre, 2019). En contraparte, el diseño y operación de los sistemas de destilación reactiva son considerablemente más complejos que aquellos involucrados ya sea en los reactores convencionales o en las columnas de destilación convencionales (Taylor y Krishna, 2000) debido a que involucra fenómenos de transporte, equilibrio químico y de fases en sistemas multicomponentes al mismo tiempo. El diseño se basa en establecer las dimensiones, condiciones de operación, estructura, reacciones involucradas y medidas de seguridad necesarias para la columna de destilación (Vela y Vázquez, 2012). Además, ya que la DR depende de la naturaleza del sistema, cuando las transformaciones químicas son complejas y suceden en fase gas o a presiones muy altas, llevar a cabo la destilación y reacción en un mismo equipo puede no ser conveniente (Sánchez-Daza, Pérez-Cisneros, Ortiz-Muñoz y Luna-Ortega, 2006). También, debe incluirse en el diseño de columnas de destilación reactiva la minimización de la pérdida de exergía o trabajo útil (Sakhre, 2019).

Dada la importancia que ha ido ganando la DR, aunado a lo anterior se están desarrollando conocimientos de diseño para combinaciones novedosas de reacción y separación como destilación extractiva reactiva y reacción catalítica en columnas de destilación de pared divisoria. Esto muestra que el campo de la destilación reactiva está siendo extendido y tendrá mucho mayor impacto en el futuro cercano. Es por ello que la destilación reactiva puede verse como la precursora en el campo de la intensificación de procesos (Dragomir, 2004).

### 3. Conclusiones

La destilación reactiva es una alternativa viable para sustituir los procesos convencionales de destilación ya que ofrece múltiples beneficios, por ejemplo, el ahorro económico reflejado en la reducción de espacio, materiales y energía. Además, tiene menos riesgos para el operador, un menor impacto ambiental y requiere menos mantenimiento; lo que la ha llevado a posicionarse como una alternativa sostenible en la industria del futuro. Sin embargo, la destilación reactiva no aplica cuando las transformaciones químicas son complejas y ocurren en diferentes fasos o a presiones muy altas.

## Referencias

- Chang, R. y Goldsby, K. (2017). *Química*. Ed. McGrawHill, México.
- Chemoxy International Ltd. (2020). *Reactive distillation*. Recuperado el 16 de diciembre de 2020 de: <https://www.chemoxy.com/reactive-distillation/>
- Comisión Económica para América Latina (CEPAL). (2016). *Horizontes 2030: La igualdad en el centro del desarrollo sostenible*. Trigésimo sexto período de sesiones de la CEPAL. Naciones Unidas. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40159/4/S1600653\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40159/4/S1600653_es.pdf)
- Del Río Segovia, J. L. (2016). *Propuesta de la obtención de acetato de etilo, utilizando un solo equipo para la reacción química y la separación por destilación, a partir de ácido acético y etanol* (Tesis de licenciatura en ingeniería química industrial). Instituto Politécnico Nacional. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/22132/25-1-16964.pdf>
- Dragomir, R. M. (2004). *Synthesis and Design of Reactive Distillation Columns* (Tesis doctoral). University of Manchester Institute of Science and Technology. [https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/31674357/FULL\\_TEXT.PDF](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/31674357/FULL_TEXT.PDF)
- Green, D & Southard, M. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Education, USA.
- Gutiérrez-Guerra, R., Segovia-Hernández, J. G., & Hernández, S. (2009). Reducing energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in extractive distillation. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(2), 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.07.004>
- Harmsen, G. J. (2007). Reactive distillation: The front-runner of industrial process intensification. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(9), 774–780. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.06.005>
- Hernández Hernández, E. (2016). *Simulación dinámica y control de columnas de destilación reactiva* (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/2567>
- Keller, T. (2014). Reactive Distillation. En A. Górák & Ž. Olujić (Eds.), *Distillation* (pp. 261-294). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386878-7.00008-5>
- Medina-Leaños, R., Segovia-Hernández, J.G., & Félix-Flores, M.G. (2011). Desempeño dinámico de secuencias de destilación reactivas térmicamente acopladas en diferentes condiciones de operación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 147-160. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000100015&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000100015&lng=es&tlng=es).
- Sánchez-Daza, O, Pérez-Cisneros, E.S., Ortíz-Muñoz, E. y Luna-Ortega, C. (2006). Diseño de procesos de destilación reactiva bajo control cinético caso: Metátesis de penteno. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5(Supl. 1), 129-135.
- Sakhre, V. (2019). Reactive Distillation: Modeling, Simulation, and Optimization. En *Distillation Modelling, Simulation and Optimization*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85433>
- Ng, F.T.T. (2006). Recent Advances in Catalytic Distillation. En *Encyclopedia of Chemical Processing* (Online). Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1201/NOE0824755638>
- Taylor, R., & Krishna, R. (2000). Modelling reactive distillation. *Chemical Engineering Science*, 55(22), 5183–5229. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00120-2).
- Tuchlenski, A., Beckmann, A., Reusch, D., Düssel, R., Weidlich, U., & Janowsky, R. (2001). Reactive distillation industrial applications, process design & scale-up. *Chemical Engineering Science*, 56(2), 387–394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00240-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00240-2)
- Vela, N.S. y Vásquez, R. (2012). *Diseño preliminar de una columna de destilación reactiva*. Universidad de los Andes.

# Dinámica del desarrollo de plantas de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en distintos sustratos

## Developmental dynamics of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) on different substrates

Jaime Alcalá Gómez<sup>a\*</sup>, Martha Reyes Hernández<sup>a</sup>, Gabriela Alcalá Gómez<sup>a</sup>, Pedro Antonio García Guajardo<sup>a</sup>, Diego José Lucatero Chávez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Guadalajara, Departamento de Biotecnológicas y Ambientales, Laboratorio de Zoología, Avenida Patria 1201 Colonia Lomas del Valle, Zapopan, Jalisco, México

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

El arándano azul (*Vaccinium corymbosum* L.) conocido como blueberry o mora azul, es un fruto que crece en un arbusto perene de la familia Ericaceae. Tiene una distribución amplia a nivel mundial. Su fruto se caracteriza por su sabor y propiedades nutritivas. En los últimos años se ha incrementado la demanda de este fruto y la producción de este. En México los principales estados productores son Jalisco, Michoacán y Sinaloa. A pesar de que México se encuentra entre los principales productores de arándanos, aun se tienen problemas asociados con el uso de sustratos para las plantas. El objetivo del presente trabajo fue analizar la dinámica de las plantas de arándano en diversos sustratos. Se aplicó un diseño experimental completamente al azar en el que se incluyeron cuatro tratamientos con cinco repeticiones. Los sustratos incluidos en el experimento fueron piedra pómez triturada, perlita, peat moss, turba, vermiculita, tezontle, excretas de bovino y suelo agrícola. Se analizaron las variables, número de brotes, cantidad y calidad de frutos. Los resultados muestran que existe diferencia significativa entre los tratamientos y variables analizadas, de los que sobresale el tratamiento uno (T1), el cual incluye turba, tezontle y vermiculita. Las características que muestra el T1 favorece la absorción de nutrientes, retención de humedad y respiración de raíz.

**Palabras clave:** Brotes, Calidad, Frutos, Sustratos.

### ABSTRACT

The blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.), also known as blueberry, is a fruit that grows on a perennial shrub of the Ericaceae family. It has a wide distribution worldwide. Its fruit is characterized by its flavor and nutritional properties. In recent years, the demand and production of this fruit has increased. In Mexico, the main producing states are Jalisco, Michoacán, and Sinaloa. Although Mexico is among the leading producers of blueberries, there are still problems associated with the use of substrates for the plants. The objective of the present work was to analyze the dynamics of blueberry plants in different substrates. A completely randomized experimental design was applied in which four treatments with five replications were included. The substrates included in the experiment were crushed pumice, perlite, peat moss, peat, vermiculite, tezontle, bovine excreta and agricultural soil. The variables number of shoots, quantity and quality of fruits were analyzed. The results show that there is a significant difference between the treatments and variables analyzed, of



El presente estudio se desarrolló en el Centro de Investigación Agropecuaria y del Medio Ambiente de Tlajomulco de Zúñiga (CIAMAT) de la Universidad Autónoma de Guadalajara. El municipio de Tlajomulco se localiza en la porción media de la región centro del estado de Jalisco a 1575 metros sobre el nivel del mar. Presenta un clima semiseco, con una temperatura media de 19.7 °C y 821.9 milímetros de lluvia media anual (Gobierno del Estado de Jalisco, 2023)

## 2.2 Diseño del experimento

Se aplicó un diseño completamente al azar, en el que se incluyeron cuatro tratamientos con cinco repeticiones cada uno. Las mezclas de sustratos se prepararon de acuerdo con la siguiente descripción: el tratamiento uno (T1) constó de una mezcla homogénea con 50 % de turba (7.5L), 25 % de tezontle (3.75L) y 25 % de vermiculita (3.75L). El tratamiento dos (T2) 46 % (7L) de piedra pómez triturada también denominada Jal, 20 % (3L) de excremento de bovino y 34 (5L) % de perlita. El tratamiento tres (T3) incluyó: tezontle 20 % (3L), vermiculita 20 % (3L), perlita 20 % (3L), turba 26 % (4L) y excremento de bovino 14 % (2L), cada sustrato con 15L de contenido.

## 2.3 Características del invernadero y plantas

El invernadero usado en el estudio cuenta con una estructura de acero inoxidable, cubierta con membrana de plástico calibre 180. Cuenta con 16 metros de ancho, 20 de largo y 4.5 metros de altura. Fueron seleccionadas plantas de arándano variedad Biloxi de un año. Las plantas se recibieron en bolsas de plástico negro de 20 x 20 centímetros, las cuales contenían tierra agrícola como sustrato (Figura 1).



**Figura 1.** Trabajo en invernadero, preparación de suelo y colocación de macetas con plantas de arándano variedad Biloxi de un año.

## 2.4 Trasplante, poda y registro de datos

Se realizó el trasplante en bolsas de plástico de 20L de capacidad, color negro de 40x45. En cada bolsa se agregó un volumen de 15 litros del sustrato que le correspondía. Al finalizar el trasplante, las bolsas con las plantas se colocaron al interior del invernadero. A cada planta se le dio un espacio de un metro cuadrado, para facilitar el manejo de las ramas en cada planta modificado (Álvarez-Robledo et al., 2020). 15 días posteriores a la llegada de las plantas, se realizó un cambio de bolsa, a una de mayor volumen en donde estuvieron toda su etapa productiva. Posterior al cambio de bolsa, se realizó una poda de rejuvenecimiento para el desarrollo de brotes y ramas nuevas. Concluida la poda, para evitar el crecimiento y desarrollo de hongos (Agrios, 2004), se aplicó 50g del fungicida

polvo humectante de marca Mancozeb disuelto en 200ml de pintura vinílica y 100 ml de agua, en las partes donde se realizaron los cortes.

Se realizó un seguimiento posterior a la poda de las plantas, en el que se cuantificó el número de brotes en cada planta. Al pasar la etapa de floración, se realizó el registro de datos donde se contó y pesó el total de frutos en cada planta. Como parte de la evaluación de calidad, se determinó la cantidad de azúcares de los frutos (°Brix) con un refractómetro.

## 2.5 Análisis de la información

Como variables de respuesta se consideró, el número de brotes posterior a la poda, total de frutos, peso de los frutos y concentración de azúcar en frutos (°Brix). En función de los distintos sustratos aplicados en tres tratamientos y un control. Con los datos obtenidos se realizaron análisis estadísticos mediante modelos lineales generalizados (GLM) y pruebas post-hoc Tukey, con el paquete estadísticos Jamovi versión 2.3.28.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Número de brotes

El análisis estadístico mostró diferencias significativas en el número de brotes entre los distintos sustratos aplicados (GLM:  $\chi^2 = 14.4$ ,  $df = 3$ ,  $P = 0.002$ ). Las pruebas post-hoc de Tukey confirmaron que los tratamientos difieren significativamente del control. El tratamiento 1 (turba 50 %, tezontle 25 %, vermiculita 25 %) fue el más efectivo, con un promedio de 5.67 brotes, superando tanto al control como a los tratamientos 2 y 3, que obtuvieron 2.10, 3.88 y 2 brotes, respectivamente (Figura 2). Estos resultados contrastan con los reportados por Zárate et al., (2019), quienes no encontraron diferencias significativas en un estudio similar. No obstante, la inclusión de corteza de pino en todos los tratamientos en el estudio de Zárate podría haber contribuido a la uniformidad en el número de brotes. En este sentido, Ochmian et al., (2009) sugiere que las variaciones en los sustratos pueden influir en la disponibilidad de nutrientes para la planta, lo cual se ve afectado por el tamaño de las partículas del sustrato. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio podrían estar asociados con las características de las mezclas de sustratos y su influencia en la cantidad de brotes tras la poda.

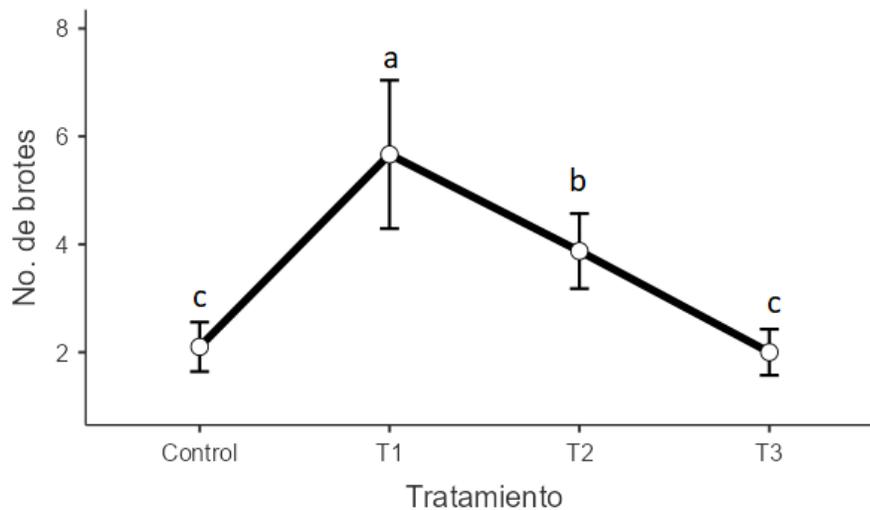


Figura 2. Número de brotes después de la poda de rejuvenecimiento.

### 3.2 Cantidad y calidad de los frutos

El análisis estadístico mostró diferencias significativas en la producción de frutos en función del sustrato utilizado (GLM:  $\chi^2 = 57.0$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.001$ ). Las pruebas post-hoc de Tukey revelaron que el tratamiento T1 (turba 50 %, tezontle 25 %, vermiculita 25 %) produjo una mayor cantidad de frutos en comparación con el control y los tratamientos 2 y 3 (Figura 3). Este aumento en la producción de frutos en el tratamiento T1 se puede atribuir al alto contenido de turba en la mezcla, dado que, como mencionan Robledo et al., (2020), la turba posee características que permiten retener niveles adecuados de humedad, lo cual beneficia el desarrollo de las plantas. La combinación de turba y vermiculita también parece favorecer tanto la cantidad como la calidad de los frutos. Estudios previos, como el de Zárate et al., (2019), también han encontrado diferencias significativas en la producción al incluir corteza de pino, turba y vermiculita. De manera consistente, las propiedades físicas y químicas de los sustratos influyen en la productividad de las plantas, como lo señala Kingston et al., (2020). Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en este estudio, donde se observa un incremento en la producción de frutos en los tratamientos con sustratos modificados en comparación con el control.

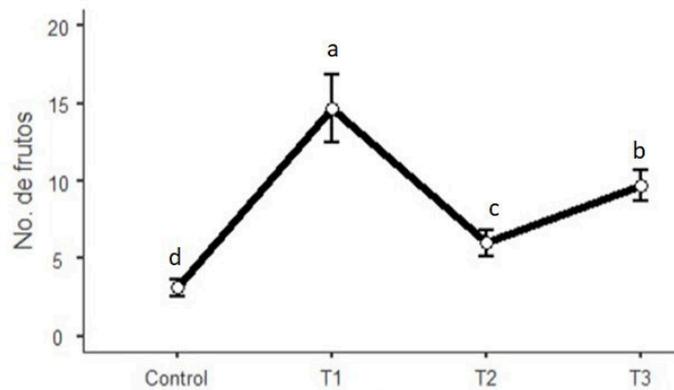


Figura 3. Número de frutos después de la poda de rejuvenecimiento.

El análisis estadístico mostró diferencias significativas en el peso promedio de los frutos entre los diferentes sustratos aplicados (GLM  $\chi^2 = 563$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.001$ ). Las pruebas post-hoc de Tukey revelaron valores similares entre los tratamientos T1 y T3, con promedios de 0.776 y 0.762 gramos, respectivamente (Figura 4). Este desarrollo de frutos puede estar relacionado con las propiedades físicas y químicas de los sustratos, así como con el contenido de materia orgánica, como lo mencionan Xie et al. (2009). No obstante, en este estudio, el control mostró un peso promedio más elevado en comparación con los tratamientos, lo que sugiere que otros factores, como la composición del sustrato o la disponibilidad de nutrientes, podrían haber influido en este resultado.

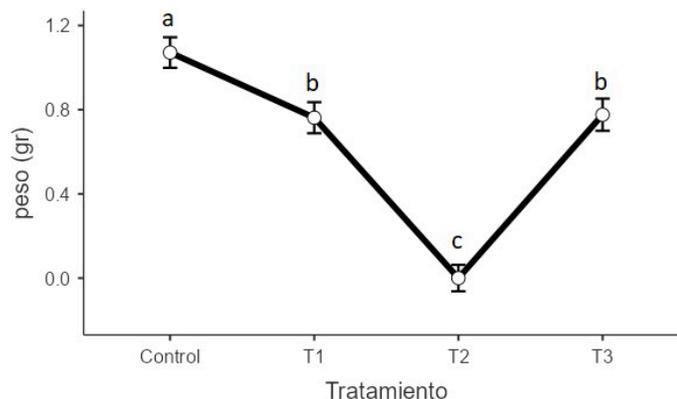


Figura 4. Peso de los frutos en gramos después de la poda de rejuvenecimiento.

El contenido de azúcares (°Brix) es un parámetro clave para la comercialización de frutos tanto en mercados nacionales como internacionales, junto con el peso y tamaño. En este estudio, se observaron diferencias estadísticamente significativas en esta variable entre los distintos tratamientos (GLM:  $\chi^2 = 173$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.001$ ). Las pruebas post-hoc de Tukey mostraron que el tratamiento T1 alcanzó un promedio de 10 °Brix, superando ligeramente al control, que tuvo un promedio de 9.73 °Brix. Los frutos de las plantas en el tratamiento T1 presentaron un mayor contenido de azúcares en comparación con los tratamientos 2 y 3 (Figura 5). Los diferentes sustratos utilizados, así como su capacidad para retener humedad y nutrientes, podrían haber favorecido tanto el tamaño de los frutos como su concentración de azúcares, como lo mencionan estudios previos (Fang et al., 2022; Smerk et al., 2021). Esto sugiere que la elección de sustrato juega un papel crucial en la calidad del fruto en términos de su valor comercial.

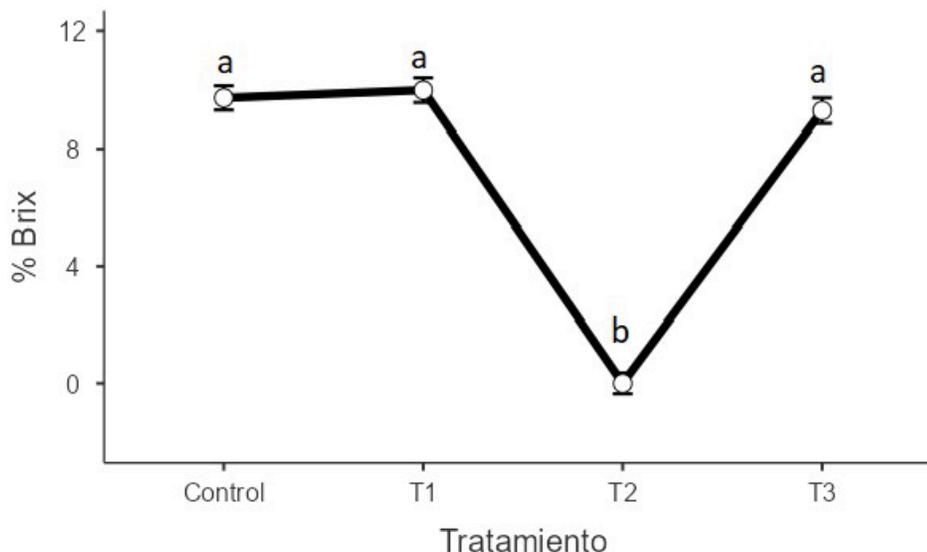


Figura 5. Cantidad de azúcares en °Brix obtenidos de frutos posterior a la poda de rejuvenecimiento.

#### 4. Conclusiones

El tratamiento T1 (compuesto por 50 % turba, 25 % tezontle y 25 % vermiculita) demostró ser el sustrato más adecuado para el cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L. var. Biloxi), al proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento y la producción de frutos. Esta mezcla, con sus porcentajes balanceados, mejoró la aireación y la capacidad de intercambio catiónico, lo que favoreció tanto la absorción de minerales y nutrientes como la respiración de las raíces. Como resultado, se observó una mayor cantidad de brotes, así como una mayor calidad y cantidad de frutos. Las propiedades físicas y químicas del sustrato T1 parecen haber creado un ambiente favorable para el desarrollo general de las plantas, optimizando los procesos fisiológicos que sustentan su crecimiento y productividad.

#### Agradecimientos

Un agradecimiento especial al personal operativo del rancho CIAMAT de la Universidad Autónoma de Guadalajara por el apoyo otorgado en actividades asociadas a este proyecto.

#### Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

## Contribución de autores

Conceptualización: Jaime Alcalá Gómez y Martha Reyes Hernández; Metodología y desarrollo de del proyecto: Jaime Alcalá Gómez, Martha Reyes Hernández, Pedro Antonio García Guajardo, Diego José Lucatero; Escritura, revisión y edición del manuscrito: Jaime Alcalá Gómez, Martha Reyes Hernández, Gabriela Alcalá Gómez

## Referencias

- Álvarez-Robledo, Y. A., Oliva Cruz, M., Collazos Silva, R., Vilca Valqui, N. C., & Huaman, E. H. (2020). Desempeño agronómico de cuatro variedades de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) Cultivadas en diferentes sustratos y pisos altitudinales. *Bioagro*, 32(3).
- Agrios G. 2004. *Plant Pathology*. 5 ed. Elsevier Academic Press. New York, USA. 922.
- Albert, T., Karp, K., Starast, M., & Paal, T. (2010). The effect of mulching and pruning on the vegetative growth and yield of the half-high blueberry. *Agronomy Research*, 8(1), 759-769.
- Bañados, P., Donnay, D., & Uribe, P. (2007). Poda en verde en arándanos. *Revista Agronomía y Forestal Pontificia Universidad Católica de Chile*, 31(1), 17-19.
- Cruz, O. A. P. (2018). Análisis de la cadena productiva del arándano en México y Chile. *PORTES, Revista Mexicana de Estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, 12(23), 31-62.
- Fang, Y., Nunez, G., Fisher, P., & Munoz, P. R. (2022). Effect of container size, substrate composition, and genotype on growth and fruit quality of young southern highbush blueberry in a container-based intensive production system. *Scientia Horticulturae*, 302, 111149. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111149>
- Fang, Y., Nunez, G. H., Silva, M. N. D., Phillips, D. A., & Munoz, P. R. (2020). A review for Southern Highbush Blueberry alternative production systems. *Agronomy*, 10(10), 1531. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101531>
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- Kingston, P. H., Scagel, C. F., Bryla, D. R., & Strik, B. C. (2020). Influence of perlite in peat-and coir-based media on vegetative growth and mineral nutrition of highbush blueberry. *HortScience*, 55(5), 658-663. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14640-19>
- Narrea, M., Coca, E. H. H., Jiménez, J. O. D., & Copacandori, J. A. V. (2022). Management of *Chloridea virescens* (Noctuidae) in blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) to promote sustainable cultivation in Peru: A Review. *Peruvian Journal of Agronomy*, 6(1), 78-89. <https://doi.org/10.21704/pja.v6i1.1893>
- Ochmian, I., Grajkowski, J., Mikiciuk, G., Ostrowska, K., & Chelpinski, P. (2009). Mineral composition of high blueberry leaves and fruits depending on substrate type used for cultivation. *Journal of Elementology*, 14(3), 509-516.
- Ortiz-Delvasto, N., Garcia-Ibañez, P., Olmos-Ruiz, R., Bárzana, G., & Carvajal, M. (2023). Substrate composition affects growth and physiological parameters of blueberry. *Scientia Horticulturae*, 308, 111528. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111528>
- Robledo, Y. A. Á., Cruz, M. O., Silva, R. C., Valqui, N. C. V., & Huaman, E. H. (2020). Desempeño agronómico de cuatro variedades de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivadas en diferentes sustratos y pisos altitudinales. *Bioagro*, 32(3), 187-194.
- San Martín, J. (2009). Manejo de poda en arándanos (N° 40). Instituto de investigaciones agropecuarias. informativo INIA RAIHUEN. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/4325>
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. *Eur. J. Hortic. Sci*, 83(5), 280-293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>

- SIAP (2022). Panorama Agroalimentario 2022. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP-SAGARPA. Ciudad de México. 215p
- Smrke, T., Veberic, R., Hudina, M., Stamic, D., & Jakopic, J. (2021). Comparison of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) under ridge and pot production. *Agriculture*, 11(10), 929. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100929>
- Strik, B. C., Davis, A. J., Bryla, D. R., & Orr, S. T. (2020). Individual and combined use of sawdust and weed mat mulch in a new planting of northern highbush blueberry I. Impacts on plant growth and soil and canopy temperature. *HortScience*, 55(8), 1280-1287. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15122-20>
- Gobierno del Estado de Jalisco. (s. f.). (2023). <https://www.jalisco.gob.mx/tlajomulco-de-zuniga>
- Xie, Z. S., Wu, X. C., & Hummer, K. (2009). Studies on substrates for blueberry cultivation. *Acta Horticulturae*, 810, 513-520. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.810.68>
- Yang, H., Duan, Y., Wei, Z., Wu, Y., Zhang, C., Wu, W., & Li, W. (2022). Integrated Physiological and Metabolomic Analyses Reveal the Differences in the Fruit Quality of the Blueberry Cultivated in Three Soilless Substrates. *Foods*, 11(24), 3965. <https://doi.org/10.3390/foods11243965>
- Zárate, N. B., López, J. P., & Domínguez, V. M. (2019). Evaluación de sustratos ecocompatibles en el cultivo de arándano (*vaccinium corymbosum* l.) en asunción nochixtlán, Oaxaca/Evaluation of ecocompatible substrates in the cultivation of blueberry (*vaccinium corymbosum* l.) in asunción nochixtlán, Oaxaca. *Universidad & ciencia*, 8, 135-146.

# Obtención del Modelo Lineal de un Parque Eólico Utilizando la Linealización Recursiva

## Obtaining the Linear Model of a Wind Farm using the Recursive Linearization

Sergio Uriel Molina Pineda<sup>a,b</sup>, Marcos Alfredo Hernández Ortega<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Programa de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Guadalajara;  
sergio.molina@edu.uag.mx

<sup>b</sup> Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, Cinvestav,  
Sergio.Molina@cinvestav.mx

<sup>c</sup> Departamento de Electromecánica, Universidad Autónoma de Guadalajara;  
marcos.hernandez@edu.uag.mx

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

La generación de electricidad por medio de energías renovables ha tenido un gran desarrollo en las últimas décadas; sin embargo, su inclusión conlleva algunas consecuencias sobre el funcionamiento de los sistemas eléctricos convencionales. Por ello, es de gran importancia contar con modelos adecuados que permitan evaluar dichos efectos. En especial, los modelos lineales son muy utilizados para análisis de estabilidad y diseño de controles. Existen distintos modelos y configuraciones de turbinas eólicas que pueden ser utilizadas en los parques eólicos; para la presente investigación se consideran generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG, por sus siglas en inglés). En este trabajo, para obtener la representación lineal de un sistema de potencia con parques eólicos, se utiliza el método de la linealización recursiva y se compara contra otros métodos de linealización convencionales. El modelo obtenido es aplicado al sistema IEEE de 16 máquinas, sustituyendo un generador síncrono por un parque eólico, y es posteriormente utilizado para evaluar los efectos de los parques eólicos sobre la estabilidad en las dinámicas electromecánicas: los modos electromecánicos, los factores de participación y las estructuras espaciotemporales de los modos de oscilación inter-área. Las conclusiones de los análisis realizados, así como posibles trabajos futuros que puedan surgir a partir del presente trabajo son también mencionados.

**Palabras clave:** energías renovables, parques eólicos, transitorios electromecánicos, linealización recursiva.

### ABSTRACT

The electricity generation by means of renewable energy sources has experienced a great development in the few past decades. However, its inclusion may bring some consequences on the conventional electric power systems behavior. Therefore, it is of great importance to have adequate models that allow the evaluation of such effects. Particularly, the linear models are often used for stability analysis and for controller design. There exist many models and configurations that can be used in the wind farms; for the present research, doubly-fed induction generators (DFIG) are



naturaleza no lineal de las fuentes de energía renovables (Zeinali Davarani, 2014), (Tian, 2018).

No obstante, las dos técnicas mencionadas anteriormente se basan en linealizaciones de alto orden del sistema eléctrico de potencia, por lo que se requiere un modelo lineal confiable del sistema de potencia que considere la inclusión de energías renovables para la realización de estudios electromecánicos. Debido a que el modelo de los parques eólicos es altamente no lineal, su linealización puede llegar a ser muy compleja y demandante computacionalmente (Zeinali Davarani, 2014). Dentro de los modelos existentes, el de mayor uso actual y mayor flexibilidad es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés), el cual será considerado en la presente investigación.

El proceso de linealización se realiza convencionalmente por medio de la linealización analítica (LA), o utilizando métodos por perturbación, como la aproximación de diferencia hacia adelante (ADA) o la aproximación por diferencias centrales (ADC). Estos métodos son utilizados por diversos programas tanto de índole académico como comercial (Persson, 2008). La linealización analítica resulta en un modelo exacto; sin embargo, su implementación está computacionalmente limitada a sistemas de pequeña dimensión. En cambio, los métodos por perturbación son aproximaciones numéricas que, aunque son mucho más rápidos, son susceptibles a errores de aproximación grandes. Por otro lado, la linealización recursiva (LR) es un método alternativo con el que se puede realizar una linealización rápida y sencilla de sistemas complejos. Además, tiene la ventaja de presentar la precisión del método LA, pero con un esfuerzo computacional en un orden similar a los métodos ADA y ADC (Hernández-Ortega, 2020a).

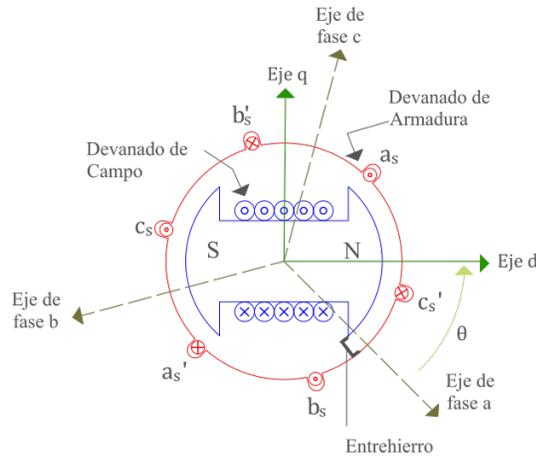
En el presente documento, se presenta la obtención del modelo lineal de un sistema eléctrico de potencia con parques eólicos utilizando el método de la linealización recursiva. Para la validación del modelo lineal obtenido, se realizó una aplicación al sistema IEEE de 16 máquinas, sustituyendo un generador síncrono por un parque eólico. Se presentan comparaciones contra la linealización analítica y las técnicas de linealización por perturbación que demuestran la utilidad y precisión de la propuesta. Posteriormente, el modelo lineal obtenido es utilizado para evaluar los efectos de los parques eólicos sobre la estabilidad en las dinámicas electromecánicas por medio de los modos electromecánicos, los factores de participación y las estructuras espaciotemporales de los modos de oscilación inter-área. La importancia de este trabajo radica en ser el primer paso hacia la obtención de modelos linealizados de alto orden que puedan ser utilizados en el futuro para el diseño de esquemas de control de área amplia.

## **2. Estructura de un Sistema Eléctrico Convencional**

Antes de introducir los modelos de las turbinas eólicas basadas en DFIG, resulta conveniente estudiar las características generales del modelo de un sistema eléctrico convencional y del generador síncrono.

### **2.1 Modelo Transitorio de un Generador Síncrono**

De manera general, la construcción de un generador síncrono se ilustra en su vista seccional en la Figura 1, la cual corresponde a un generador síncrono trifásico de polos salientes con dos polos por fase (Kundur, 1994).



**Figura 1.** Diagrama seccional de un generador síncrono mostrando los ejes directo y en cuadratura.

En estado estable, la velocidad de operación del rotor es igual a la velocidad síncrona  $\omega_0$ . En las ecuaciones que describen el comportamiento del generador, interactúan diferentes circuitos, generando inductancias propias y mutuas que dependen de la posición del rotor. Por ello, se introducen los ejes directo  $d$  y en cuadratura  $q$ , donde el eje  $d$  está alineado con el norte magnético del rotor, mientras que el eje  $q$  está a  $90^\circ$  del eje  $d$ , como se ilustra en la Figura 1.

En este modelo transitorio, el modelo de la máquina síncrona cuenta con 4 estados: la desviación de velocidad angular,  $\Delta\omega$ ; el ángulo interno del rotor,  $\delta$ ; la componente de eje  $d$  del voltaje interno,  $E'_d$ ; y la componente de eje  $q$  del voltaje interno,  $E'_q$ , cuyas ecuaciones diferenciales son mostradas a continuación en las ecuaciones (1) a (4):

$$\frac{d}{dt}\Delta\omega = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D\Delta\omega) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\delta = \omega_0\Delta\omega \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}E'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(E_{fd} - I_{fd}) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}E'_d = \frac{1}{T'_{q0}}[-E'_d + (X_q - X'_q)i_q] \quad (4)$$

donde  $T_m$  y  $T_e$  son los pares mecánico y eléctrico del generador síncrono, respectivamente;  $H$  corresponde a la constante de inercia,  $K_D$  a un coeficiente de amortiguamiento propio de la máquina,  $E_{fd}$  e  $I_{fd}$  representan el voltaje y la corriente de campo;  $T'_{d0}$  y  $T'_{q0}$  son las constantes de tiempo de circuito abierto de ejes  $d$  y  $q$ , y los términos  $X_q$  y  $X'_q$  son las reactancias síncrona y transitoria de eje  $q$ , respectivamente.

Más detalles acerca de las ecuaciones dinámicas del generador síncrono pueden encontrarse en (Molina-Pineda, 2021).

Adicionalmente, se considera que cada generador está equipado con un sistema de excitación como el que se ilustra en la Figura 2, donde  $V_{ref}$  es el voltaje de referencia o deseado,  $V_{TR}$  es el voltaje entregado por el transductor,  $|E_T|$  e  $I_T$  representan las magnitudes de voltaje y corriente en las terminales del generador, respectivamente.  $V_S$  es una señal de voltaje suplementaria y  $V_R$  es la señal de control de voltaje resultante. La variable  $\omega_r$  es la velocidad angular del rotor. Los elementos

del diagrama de bloques son revisados en las siguientes subsecciones.

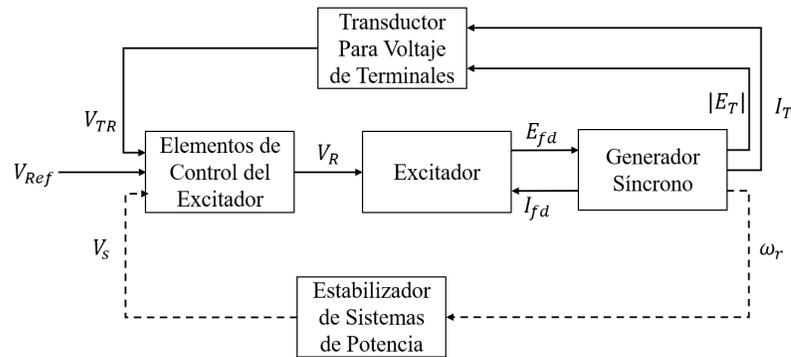


Figura 2. Diagrama del funcionamiento general de un sistema de excitación (Kundur, 1994).

## 2.2 Modelo del Excitador

En la Figura 2, los bloques “Transductor para Voltaje de Terminales”, “Elementos de Control del Excitador” y “Excitador” pertenecen al modelo de excitador de un generador síncrono. Para este trabajo, se considera que los generadores están equipados con un excitador de tipo simple, cuyo diagrama de bloques se ilustra en la Figura 3 siguiente, donde  $T_R$  es la constante de tiempo del transductor,  $E_{rr}$  es la señal de error del control,  $V_A$  es una variable de estado del bloque atraso-adelanto,  $T_A, T_b$  y  $T_c$  son constantes de tiempo propias del excitador,  $K_A$  es la ganancia del excitador, y  $V_{RMAX}$  y  $V_{RMIN}$  son los valores máximo y mínimo del regulador, respectivamente (Rogers, 2000).

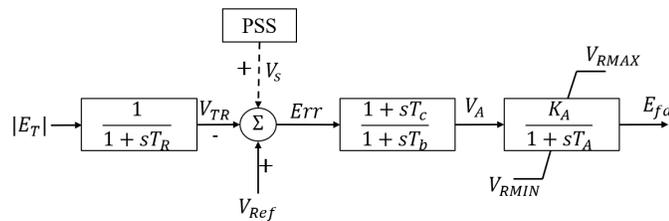


Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de excitación simple (Rogers, 2000).

Del diagrama de bloques anterior se derivan tres ecuaciones diferenciales, resultando en tres variables de estado adicionales por cada excitador.

## 2.3 Modelo del Estabilizador de Sistemas de Potencia

Además del excitador, en la Figura 2 se incluye el estabilizador de sistemas de potencia, mejor conocido como PSS, por sus siglas en inglés. El diagrama de bloques que describe su funcionamiento se provee en la Figura 4 de abajo (Rogers, 2000).

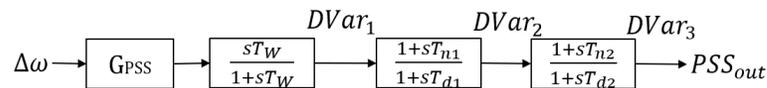


Figura 4. Diagrama de bloques de un estabilizador de sistema de potencia (Rogers, 2000).

En el diagrama de la Figura 4,  $G_{PSS}$  y  $T_W$  son la ganancia y la constante de tiempo del PSS, respectivamente. Las constantes  $T_{nj}$  y  $T_{dj}$  para  $j=1, 2$ , son constantes de tiempo para el ajuste de los dos bloques de retraso-adelanto. Las variables  $DVar_1, DVar_2$  y  $DVar_3$  son las 3 variables de estado del dispositivo, mientras que el término  $[[PSS]]_{out}$  es equivalente a  $V_s$ .

## 2.4 Interacción con la Red

Cada uno de los  $n_g$  generadores síncronos del sistema de potencia, equipados con sus equipos de control respectivos, se conecta a la red eléctrica a través de su resistencia de armadura y su reactancia síncrona  $(R_a + jX_s)$ , en algún bus específico, a un voltaje de terminales  $V_{T1} \angle \theta_1$  e inyectando una corriente  $I_g$ , tal como se ilustra en la Figura 5.

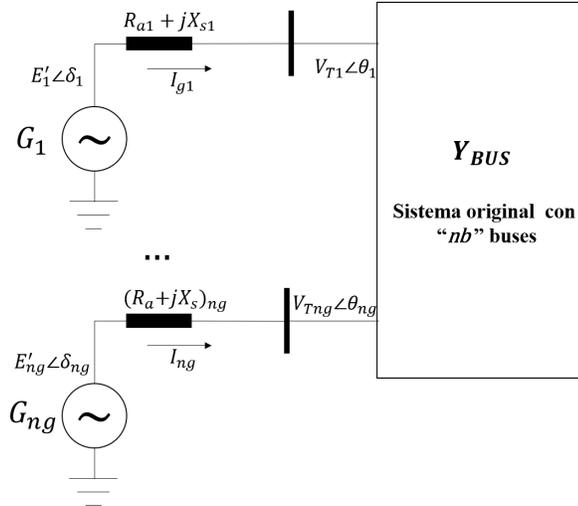


Figura 5. Integración de generadores síncronos al sistema de potencia.

donde  $Y_{BUS}$  es la matriz de admitancias de red del sistema, y  $E_j' \angle \delta_j$  es el voltaje interno del generador.

La interacción entre los generadores se da por medio de la ecuación de circuito mostrada en la ecuación (5).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{Lg} \\ \mathbf{Y}_{gL} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}' \\ \mathbf{V}_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

siendo  $\mathbf{I}_g$  el vector de fasores de corrientes entregadas por los generadores síncronos,  $\mathbf{E}'$  el vector de fasores de voltajes internos de los generadores,  $\mathbf{V}_t$  el vector de fasores de voltajes de los buses del sistema, y donde las sub-matrices  $\mathbf{Y}_{gg}$ ,  $\mathbf{Y}_{Lg}$ ,  $\mathbf{Y}_{gL}$  y  $\mathbf{Y}_{LL}$  denotan partes de  $Y_{BUS}$  que relacionan a los generadores con los generadores, los generadores con los buses de la red, los buses de la red con los generadores o los buses de la red consigo mismos, respectivamente.

La ecuación (5) se puede reducir en la forma más simple desplegada en la ecuación (6), donde

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gL} \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \mathbf{Y}_{Lg}$$

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{red} \mathbf{E}' \quad (6)$$

## 3. Integración de Parques Eólicos

### 3.1 Generadores DFIG

Una turbina eólica basada en un generador DFIG utiliza un generador con rotor devanado con anillos deslizantes que permiten la operación en velocidad variable controlando el voltaje que lo alimenta, el cual es alimentado a través de un convertidor de potencia de frecuencia variable. Usualmente, el

convertidor está formado por dos dispositivos capaces de convertir la potencia eléctrica de señal alterna a señal directa y viceversa, (Voltage Source Converters – VSCs), con la finalidad de desacoplar la frecuencia eléctrica de la frecuencia mecánica del rotor. Esto se logra con dispositivos de electrónica de potencia, como se ilustra en la Figura 6. Sin embargo, para estudios electromecánicos, estos dispositivos se simplifican con un par de controles de tipo Proporcional-Integral (PI) (Anaya-Lara, 2009).

### 3.2 Formulación Matemática

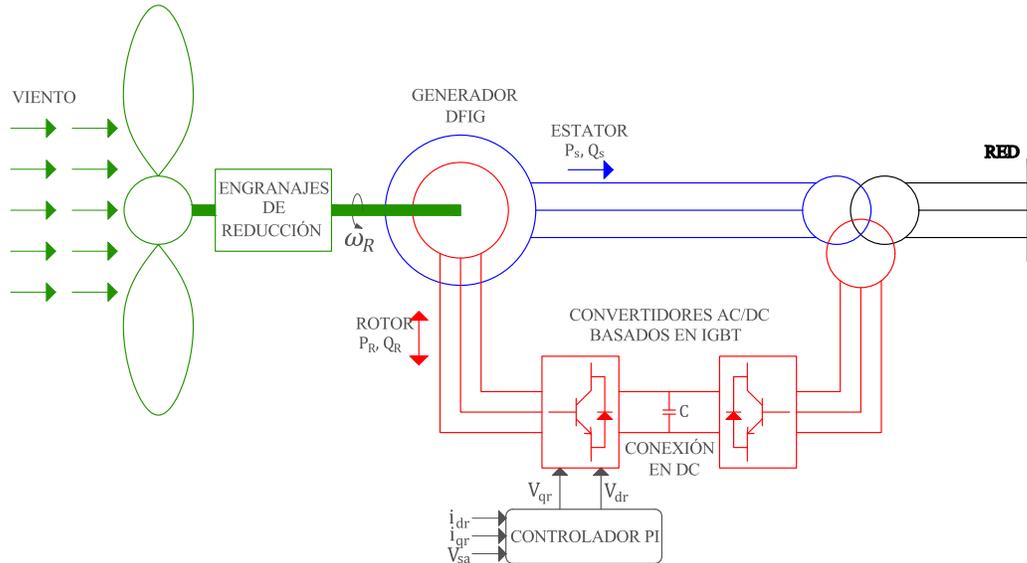


Figura 6. Representación de la conexión eléctrica de un generador DFIG con la red.

En la Figura 6,  $P_s$  y  $Q_s$  representan la potencia activa y reactiva que fluyen a través del estator, mientras que  $P_r$  y  $Q_r$  pertenecen a la potencia fluyendo a través del rotor. Los pares  $i_{dr}, i_{qr}$  y  $V_{dr}, V_{qr}$  son las componentes de eje d y eje q del voltaje y corriente del rotor. Por su parte,  $V_{sa}$  es la amplitud de voltaje de estator.

Dentro del modelado del dispositivo DFIG, un aspecto muy importante a resaltar es que el modelado electromecánico de la turbina es equivalente al modelo de cualquier máquina asíncrona de rotor devanado, cuyo circuito equivalente es dibujado en la Figura 7, donde  $R_r$  y  $R_s$  son las resistencias de los devanados de rotor y estator, respectivamente;  $X_{rr}$  y  $X_{ss}$  son las correspondientes reactancias de rotor y estator.  $I_r$  e  $I_s$  son los fasores de corriente del rotor y del estator,  $V_r$  y  $V_s$  son los fasores de voltaje del rotor y del estator y  $S_{dfig}$  es el deslizamiento (Ugalde-Loo, 2012).

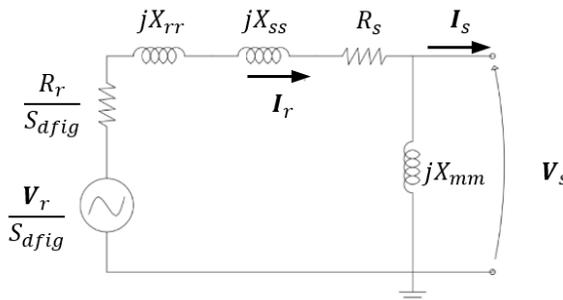


Figura 7. Circuito equivalente de un generador DFIG.

El sistema de control del DFIG que se mencionó anteriormente se basa en las características electromecánicas del dispositivo, en las ecuaciones electromecánicas y en dos objetivos principales:

(1) Permitir la operación en velocidad variable y (2) extraer la mayor cantidad de potencia del viento. Para el segundo punto, se hace uso de una curva MPPT (por sus siglas en inglés – Maximum Power Point Tracking).

Dentro de las técnicas más utilizadas para el control de los generadores DFIG, se encuentra un método en el cual, la corriente del rotor se divide en sus componentes en eje directo  $i_{dr}$  y en eje de cuadratura  $i_{qr}$ . La componente en q se utiliza para regular el torque y la componente en d, para el voltaje en terminales. Estos dos controles se detallan a continuación (Anaya-Lara, 2009).

### 3.3 Control Basado en el Torque

Con este control, se busca que el torque electromagnético de la turbina se modifique de acuerdo con las variaciones del torque producido por el viento. Dada una velocidad del rotor,  $\omega_r$ , el torque de referencia obtenido en la curva MPPT,  $T_{sp}$ , es modificado para generar un valor de referencia para la componente en q de la corriente del rotor,  $i_{qr\_ref}$ , que se compara con el valor actual de  $i_{qr}$  para determinar la señal de error  $i_{qr\_err}$ . En la Figura 8 se muestra el diagrama de control completo para el voltaje en cuadratura del rotor  $V_{qr}$ , donde el controlador PI posee una variable de estado nombrada  $X_{w3}$  con sus ganancias proporcional  $K_{ps}$  y proporcional-integral  $K_{is}$  correspondientes (Anaya-Lara, 2009).

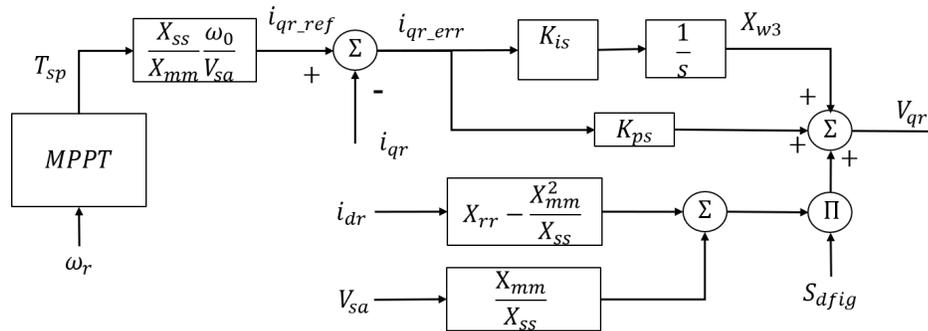
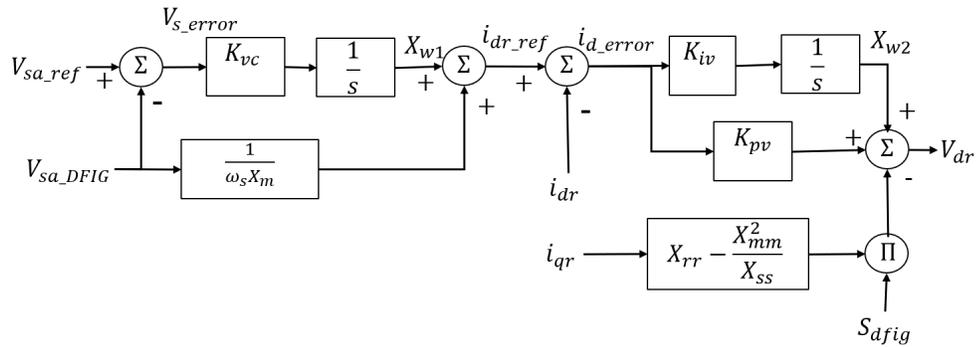


Figura 8. Diagrama de bloques para el control del voltaje del rotor en su componente en cuadratura (Anaya-Lara, 2009).

### 3.4 Control Basado en el Voltaje de Terminales

Ahora bien, la componente en el eje d del voltaje requerido,  $V_{dr}$ , para el rotor se expresa en el diagrama de bloques de la Figura 9 (Anaya-Lara, 2009). Se puede observar que las variables que entran a este diagrama de bloques son el voltaje en terminales del DFIG,  $V_{sa\_DFIG}$ , el voltaje de referencia,  $V_{sa\_ref}$ , las componentes de la corriente del rotor,  $i_{dr}$  e  $i_{qr}$ , y el deslizamiento  $S_{DFIG}$ . Como se puede observar, existe un control integral con constante  $K_{vc}$  y señal de salida  $X_{w1}$  para determinar una señal de referencia  $i_{dr\_ref}$ . Esta señal se compara con  $i_{dr}$  para obtener la señal de error  $i_{dr\_err}$  que entra a un control PI con constantes proporcional  $K_{pv}$  e integral  $K_{iv}$  y con una variable de estado denotada como  $X_{w2}$  (Anaya-Lara, 2009).

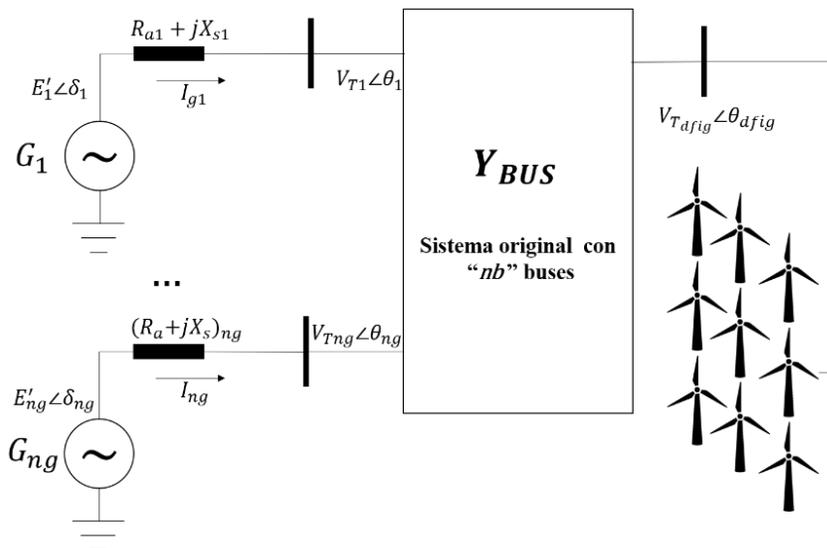


**Figura 9.** Diagrama de bloques para el control del voltaje del rotor en su componente directa (Anaya-Lara, 2009).

En general, este sistema de control tiene el objetivo de controlar el voltaje de terminales, y se encuentra desacoplado del sistema de control de la Figura 8 para poder realizar el control de las potencias real e imaginaria de forma independiente.

### 3.5 Integración con la Red

De manera similar a la integración de los generadores síncronos presentada en la Sección 2.4, podemos representar la integración de los parques eólicos de manera gráfica en la Figura 10, donde  $[V_T]_{dfig} \angle \theta_{dfig}$  representa el fasor de voltaje en terminales del DFIG.



**Figura 10.** Sistema de potencia con un parque eólico integrado.

La ecuación de la red (ecuación (6)) es entonces modificada anexando los fasores de corriente y voltaje en terminales del parque,  $I_{DFIG}$  y  $[E']_{DFIG}$ , como se muestra en la ecuación (7), donde las submatrices  $Y_{(g,DFIG)}$  y  $Y_{(DFIG,g)}$  contienen la información de conexión del DFIG con la red y  $Y_{(DFIG,DFIG)}$  es contiene todas las conexiones con el bus perteneciente al DFIG.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_{DFIG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{g,DFIG} \\ \mathbf{Y}_{DFIG,g} & \mathbf{Y}_{DFIG,DFIG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}'_g \\ \mathbf{E}'_{DFIG} \end{bmatrix} \quad (7)$$

A continuación, una visión general del método de linealización utilizado es presentado en la siguiente sección

#### 4. La Linealización Recursiva

Con el objetivo de tener un modelo lineal de un sistema dinámico descrito por ecuaciones diferenciales, se asumen pequeñas perturbaciones a alguna condición de operación dada. Dadas estas condiciones, el proceso de linealización se basa en la expansión de las ecuaciones diferenciales por medio de la serie de Taylor alrededor del punto estable del sistema (sep), y conservando únicamente el término de primer orden (Hernández-Ortega, 2020a).

Este proceso de linealización se realiza de forma convencional en los sistemas eléctricos de potencia por medio de tres métodos: la linealización analítica (LA), la aproximación por diferencias hacia adelante (ADA) y la aproximación por diferencias centrales (ADC). En (Hernández-Ortega, 2020a), se propuso un nuevo método basado en la regla de la cadena, la Linealización Recursiva (LR), que es tratada brevemente en esta sección.

##### 4.1 Formulación Matemática

Este método consiste en definir y evaluar de manera separada todas las subfunciones que describen el comportamiento dinámico del sistema en cuestión. Primero, partimos de establecer que el sistema está expresado por la ecuación (8):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (8)$$

donde  $\mathbf{f}$  contiene todas las ecuaciones del comportamiento dinámico y  $\mathbf{x}$  es el vector de estados del sistema. Ahora bien, se definen subfunciones  $\mathbf{g}_j(t)$  que resultan más sencillas de evaluar, dando como resultado:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{f}(\mathbf{g}_1(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{g}_R(\mathbf{x})) \quad (9)$$

Por definición, el término lineal de la expansión de Taylor, aplicado a un conjunto de funciones se obtiene a través de la siguiente expresión

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_0)}{\partial \mathbf{x}_j} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_{0j}) \quad (10)$$

El punto donde se evalúa este primer término de la serie es conocido como el punto estable  $\mathbf{x}_{pes}$ . Con ello, se puede expresar la ecuación (10) de la siguiente forma:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_j(t) = \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial x_1} \right|_{pes} \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial x_2} \right|_{pes} \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial x_N} \right|_{pes} \Delta x_N \quad (11)$$

donde se utiliza la notación “pes” para indicar que se está evaluando en el punto de estado estable.

Ahora, utilizando la ecuación (9) y la regla de la cadena, se puede obtener fácilmente la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{x}}_j(t) = & \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_1} \right|_{pes} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|_{pes} \Delta x_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_1} \right|_{pes} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_N} \right|_{pes} \Delta x_N + \\ & + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_2} \right|_{pes} \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_1} \right|_{pes} \Delta x_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_2} \right|_{pes} \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_N} \right|_{pes} \Delta x_N + \dots + \\ & + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_R} \right|_{pes} \left. \frac{\partial g_R}{\partial x_1} \right|_{pes} \Delta x_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_R} \right|_{pes} \left. \frac{\partial g_R}{\partial x_N} \right|_{pes} \Delta x_N \end{aligned} \quad (12)$$

Posteriormente, resulta conveniente definir los módulos linealizados de primer orden de las subfunciones  $g_k$ , denotados como  $\Delta^{(1)} g_k$ , que ayudarán a simplificar el trabajo. Los módulos  $\Delta^{(1)} g_k$  se definen como

$$\Delta^{(1)} g_k = \left. \frac{\partial g_k}{\partial x_1} \right|_{pes} \Delta x_1 + \dots + \left. \frac{\partial g_k}{\partial x_N} \right|_{pes} \Delta x_N \quad (13)$$

Utilizando la ecuación (13) en la expresión mostrada en la ecuación (12), se puede llegar a la siguiente fórmula:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_j(t) = \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_1} \right|_{pes} \Delta^{(1)} g_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_j(\mathbf{x})}{\partial g_N} \right|_{pes} \Delta^{(1)} g_N \quad (14)$$

la cual se erige como la formulación básica de la linealización recursiva de primer orden. Se debe hacer énfasis en que este método no depende de un valor de perturbación como se realiza en los métodos ADA y ADC. Además, para obtener la derivada de la función principal o los módulos linealizados de las subfunciones, los términos utilizados están evaluados a partir de un punto estable, por lo que la linealización recursiva tiene la ventaja de que no causará errores numéricos provocados por el incremento en las perturbaciones, dándole así una precisión mucho mayor a los resultados de la matriz del sistema obtenida por métodos numéricos basados en perturbaciones (Molina-Pineda, 2021).

#### 4.2 Algoritmo de Implementación

Para construir la matriz  $A$  del modelo lineal del sistema a analizar, primero se requiere tener los valores en el sep de todas las variables de estado  $x_j$  y subfunciones  $g_j$ . Posteriormente, las ecuaciones (13) y (14) son aplicadas a cada una de las funciones  $f_j$  y subfunciones  $g_j$  para obtener todos los módulos linealizados del sistema, dependientes de las perturbaciones a los estados,  $\Delta x_j$ .

Después, es necesario implementar una rutina que de manera iterativa modifique el valor de perturbación del estado  $j$ -ésimo con un valor igual a 1, generando así un vector de perturbación de estados,  $x_{(pert i)}$ , definido como:

$$\Delta \mathbf{x}_{pert i} = [0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T \quad (15)$$

Una vez definido este vector, y considerando que la matriz planta del sistema se puede expresar como un arreglo de sus columnas:  $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \dots \quad \mathbf{A}_i \quad \dots \quad \mathbf{A}_N]$ , para la iteración  $i$ , se tiene que:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{pert i} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_{pert i} = [\mathbf{A}_1 \quad \dots \quad \mathbf{A}_N] \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i \quad (16)$$

Por lo que, al evaluar todos los módulos linealizados del sistema, que equivale a obtener la expresión  $\Delta x^i$  (pert i), cada columna de la matriz A puede calcularse de manera muy sencilla.

La aplicación de la técnica LR al sistema descrito en las secciones 2 y 3, se ha omitido en este documento por razones de espacio, pero se puede consultar a detalle en (Molina-Pineda, 2021). En la siguiente sección, se presenta el caso de estudio utilizado y los resultados obtenidos.

## 5. Caso de Estudio y Resultados Numéricos

### 5.1 Caso de Estudio: Sistema Eléctrico de Potencia de 16 Máquinas

Para este caso de estudio, se analizó el sistema de potencia originalmente con 16 generadores distribuidos en 5 áreas, con 86 líneas de transmisión y 68 buses. Los datos del sistema se tomaron de un reporte de la compañía General Electric (IEEE PES, 2006), (Singh, 2013).

Las 16 máquinas cuentan con excitadores simples y solo 12 de ellas cuentan con un estabilizador de potencia PSS. El diagrama unifilar que representa a este sistema lo podemos observar en la Figura 11. En total, este sistema cuenta con 116 estados.

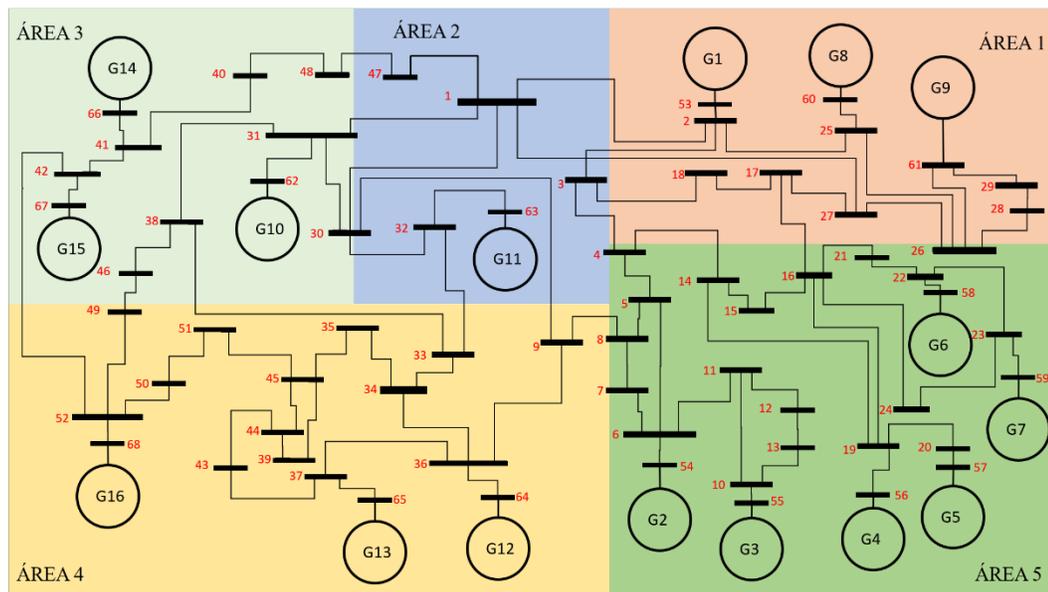


Figura 11. Sistema de potencia con 16 máquinas y 5 áreas.

Al aplicar la linealización recursiva a este modelo y posteriormente aplicar el análisis de valores propios, se obtiene la información mostrada en la Tabla 1, donde se han agregado únicamente los modos de oscilación electromecánicos. Los términos  $\sigma$  y  $\omega$  representan la parte real e imaginaria del valor propio correspondiente.

Tabla 1. Valores propios del sistema de 16 máquinas.

| Modo   | $\sigma$ | $\omega$ | Amortiguamiento | Frecuencia [Hz] |
|--------|----------|----------|-----------------|-----------------|
| 85, 86 | -0.5811  | 2.3633   | 23.88%          | 0.3761          |
| 82, 83 | -0.4232  | 3.2279   | 13.00%          | 0.5137          |
| 78, 79 | -0.7515  | 4.0925   | 18.06%          | 0.6513          |
| 76, 77 | -0.6021  | 4.9328   | 12.12%          | 0.7851          |
| 69, 70 | -1.1131  | 6.7294   | 16.32%          | 1.0710          |
| 71, 72 | -0.9646  | 6.9362   | 13.77%          | 1.1039          |
| 65, 66 | -1.7739  | 7.2264   | 23.84%          | 1.1501          |
| 67, 68 | -1.0773  | 7.4083   | 14.39%          | 1.1791          |

|        |         |         |        |        |
|--------|---------|---------|--------|--------|
| 61, 62 | -1.0296 | 8.0527  | 12.68% | 1.2816 |
| 59, 60 | -1.3551 | 8.2604  | 16.17% | 1.3147 |
| 56, 57 | -2.2607 | 8.8453  | 24.76% | 1.4078 |
| 54, 55 | -2.4076 | 9.2855  | 25.10% | 1.4778 |
| 52, 53 | -2.7576 | 9.8717  | 26.90% | 1.5711 |
| 47, 48 | -1.9909 | 11.1922 | 17.51% | 1.7813 |
| 45, 46 | -1.7601 | 11.4120 | 15.24% | 1.8163 |

De la información desplegada en la Tabla 1, se puede observar que el sistema es estable. El modo de mayor relevancia es el modo 85, 86, el cual corresponde al comportamiento inter-área de todo el sistema. A continuación, un parque eólico es añadido al análisis.

## 5.2 Caso de Estudio: Sistema Modificado de 15 Máquinas y 1 Parque Eólico

En la ilustración de la Figura 12 se muestra el sistema considerado, donde el generador síncrono que estaba conectado al bus 61 (generador G9 del área 1 en la Figura 11) ha sido reemplazado por un parque eólico que consta de un total de 332 turbinas y tiene una capacidad de generación equivalente de 800 MVA, lo cual representa un 4.35% de la generación total de potencia real.

Este sistema es utilizado como base para aplicar las técnicas de linealización convencionales y compararlas contra la linealización recursiva. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

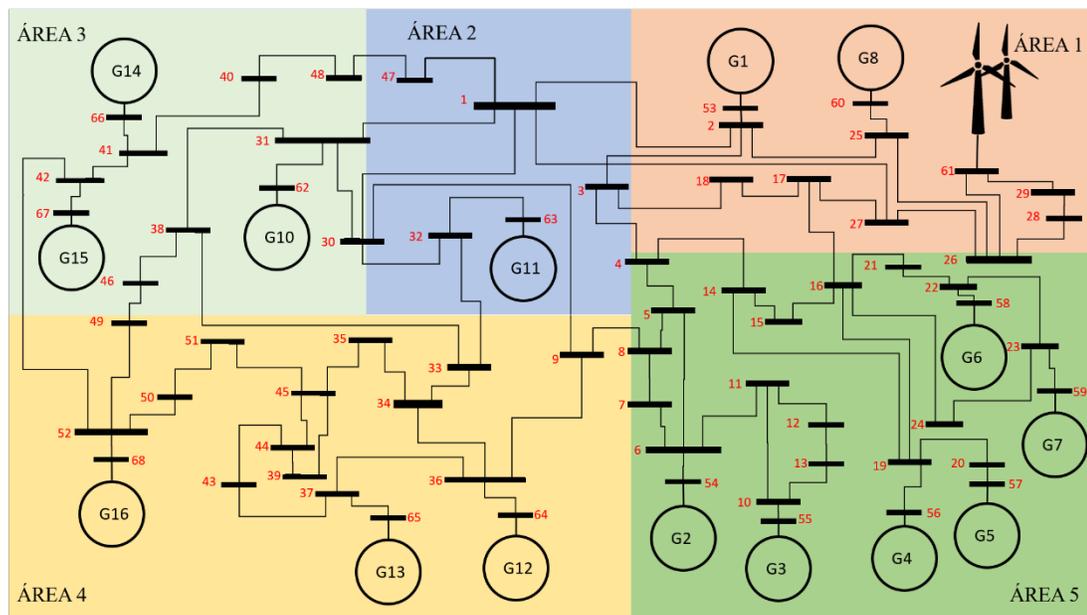


Figura 12. Sistema de potencia con 16 máquinas y 5 áreas.

## 5.3 Comparación de los Métodos de Linealización

Las ecuaciones que conforman el modelo del sistema dibujado en la Figura 12 son linealizadas utilizando los métodos LA, ADA, ADC y LR utilizando códigos de nuestra propia autoría en el software MATLAB. El primer parámetro por analizar en esta comparación es el tiempo computacional. En la gráfica de la Figura 13 podemos observar el tiempo en milisegundos que se requiere para ejecutar cada uno de los métodos numéricos, tomando en cuenta 1000 muestras de tiempos computacionales para el mismo caso. un ordenador con procesador: AMD A8-6410 APU con gráficos AMD Radeon R5, 16GB de memoria RAM y disco de estado sólido ADATA SU800 480GB. Debemos señalar que estas pruebas son demostrativas, ya que los algoritmos no están optimizados para su ejecución.

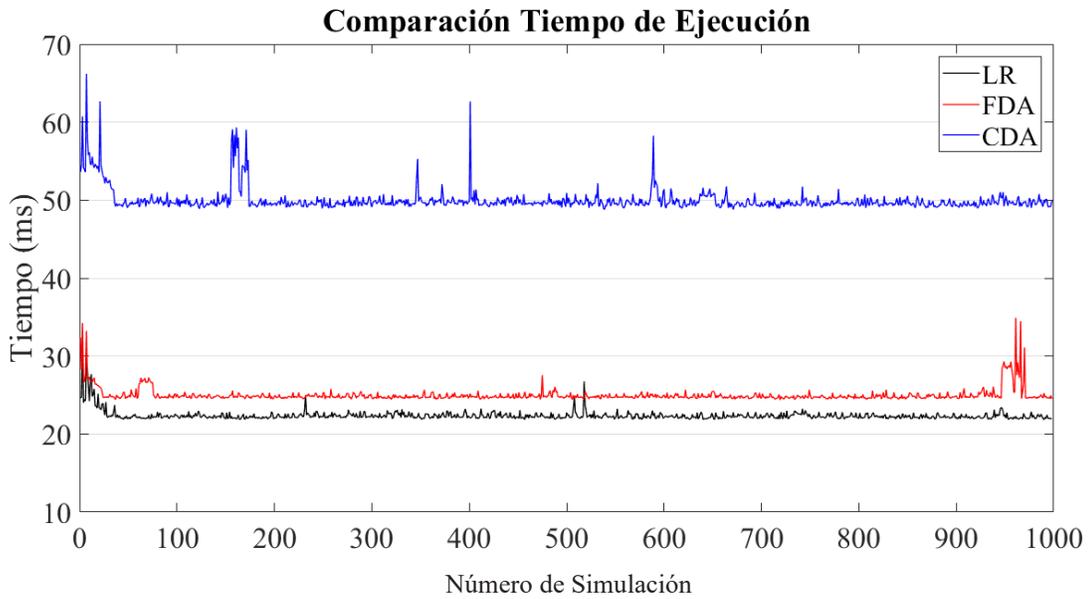


Figura 13. Comparación en tiempo de ejecución de los métodos de linealización.

Analizando la gráfica, los datos correspondientes al método ADC, como era de esperarse, requiere esencialmente el doble de tiempo comparado con el método ADA, debido a su estructura y a que requiere procesar casi el doble de instrucciones (Gill, 2019). Por otro lado, podemos observar el tiempo que requiere el método de linealización recursiva (LR) es de aproximadamente el 85% del tiempo requerido por el ADA, lo que ofrece una gran ventaja al implementarlo en sistemas mucho más complejos, ya que demanda un menor esfuerzo computacional permitiendo así crecer el número de generadores que interactúan en un sistema, controles, cargas, líneas de transmisión, etc. Además, este método permite introducir un modelo más detallado de cada uno de los elementos que interactúan en el sistema.

El segundo punto por considerar es la precisión de los métodos. El método LA es tomado como referencia para calcular la precisión de los otros tres métodos, ya que se basa en la derivación analítica de las expresiones no lineales. En la Figura 14 se presentan las precisiones de estimación de cada valor propio. En este caso, los valores propios obtenidos a partir de la matriz del sistema de cada método,  $\lambda_{ADA}$ ,  $\lambda_{ADC}$  ó  $\lambda_{LR}$  se compararon respecto a los correspondientes valores propios de la evaluación analítica  $\lambda_{LA}$ .

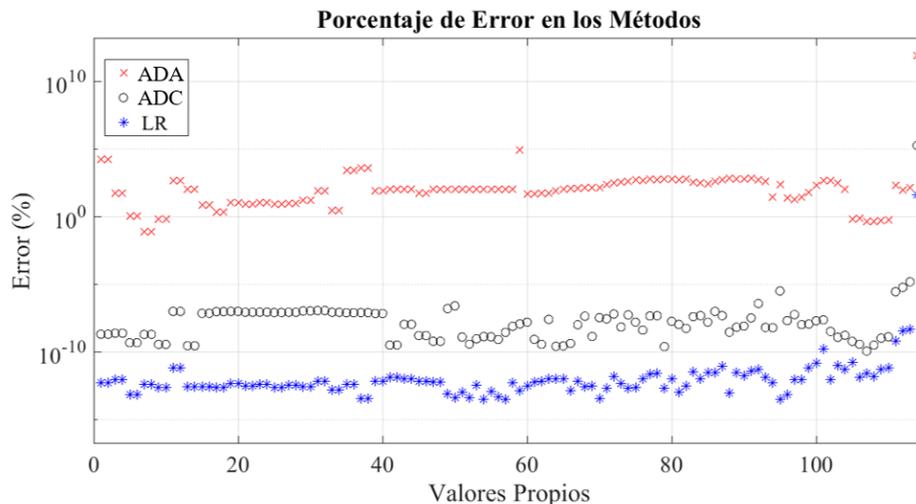


Figura 14. Porcentajes de error en la estimación de los valores propios del sistema.

El porcentaje de error de cada método de linealización, representado como %Err\_Aprox, se obtiene con la ecuación (17), donde  $\lambda_{Aprox}$  corresponde a la estimación obtenida con cada una de las aproximaciones.

$$\%Err_{Aprox} = \left| \frac{\lambda_{LA} - \lambda_{Aprox}}{\lambda_{LA}} \right| * 100\% \tag{17}$$

Aunque, como se observó en la comparación de los tiempos de ejecución, el método ADC requiere de un mayor tiempo para que se ejecute su rutina, este ofrece una mejora significativa en la precisión respecto al método ADA. No obstante, el método que ofrece una mayor precisión corresponde al de linealización recursiva, con una magnitud de error aproximada por debajo de 10-10% lo que representa una diferencia considerable respecto a los métodos por perturbación. Aunado a esto, cabe mencionar que, aunque los errores en la Figura 14 puedan considerarse importantes, numéricamente las diferencias correspondientes entre los modos obtenidos por el método LA y la RL siempre rondan la magnitud del error de punto flotante del software MATLAB.

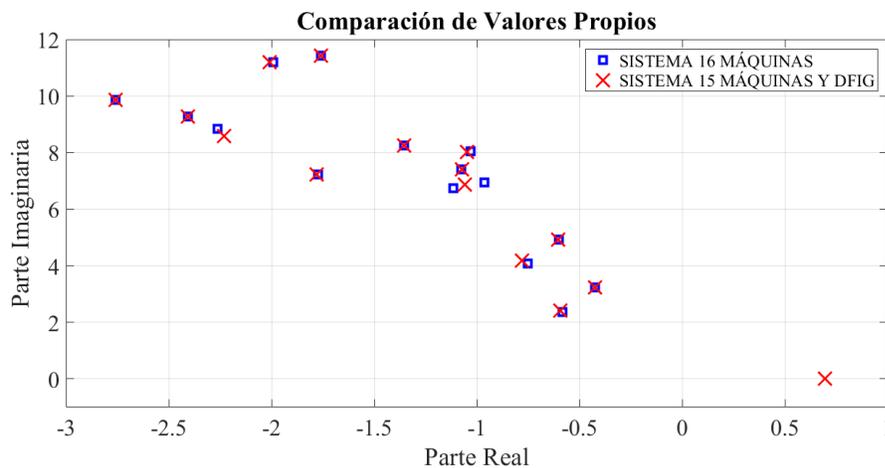
Con las comparaciones anteriores, se puede concluir que el método de linealización recursiva es una opción con mayor precisión y con un mejor rendimiento computacional, comparada con los métodos de linealización convencionales.

Ahora, se procederá a analizar el efecto que tiene la sustitución de un generador por un parque eólico. Se debe resaltar que el parque eólico es de la misma capacidad que el generador síncrono sustituido.

#### 5.4 Comparación de los Modos de Oscilación

Al aplicar la linealización recursiva al sistema de la Sección 5.2, se obtienen modos de oscilación electromecánicos muy similares a los mostrados en la Tabla 1. De particular interés, se tiene que el modo inter-área (modo 85,86 de la Tabla 1) se modifica muy ligeramente, teniendo ahora un valor de  $-0.5917 \pm j2.4042$ , lo que corresponde a una relación de amortiguamiento del 23.9% y una frecuencia de 0.382 Hz.

Para tener una visión más general de cómo se modifican los modos de oscilación electromecánicos, en la Figura 15 se grafican los valores propios correspondientes para el caso base sin parque eólico y con parque eólico. Como se puede apreciar, algunos de los valores propios se desplazan hacia la derecha, aunque siguen estando en el semiplano izquierdo. Aquí podemos observar cómo desaparece uno de los modos, debido a la ausencia del generador síncrono que fue sustituido. El modo inestable que se observa pertenece al parque eólico y se debe a la ausencia de gobernadores en el modelado de los generadores síncronos.



**Figura 15.** Comparación de los valores propios correspondientes a dinámicas electromecánicas cuando se añade un parque eólico.

Con lo anterior, se termina de describir el comportamiento del sistema eléctrico de potencia modelado con y sin la introducción del parque eólico, y se pueden observar claramente que esta modificación afecta a todo el sistema completo, aunque se sigue considerando como un sistema estable bajo el análisis de las dinámicas electromecánicas. La poca variación de los modos electromecánicos valida el modelo lineal del parque eólico que se obtuvo en este trabajo.

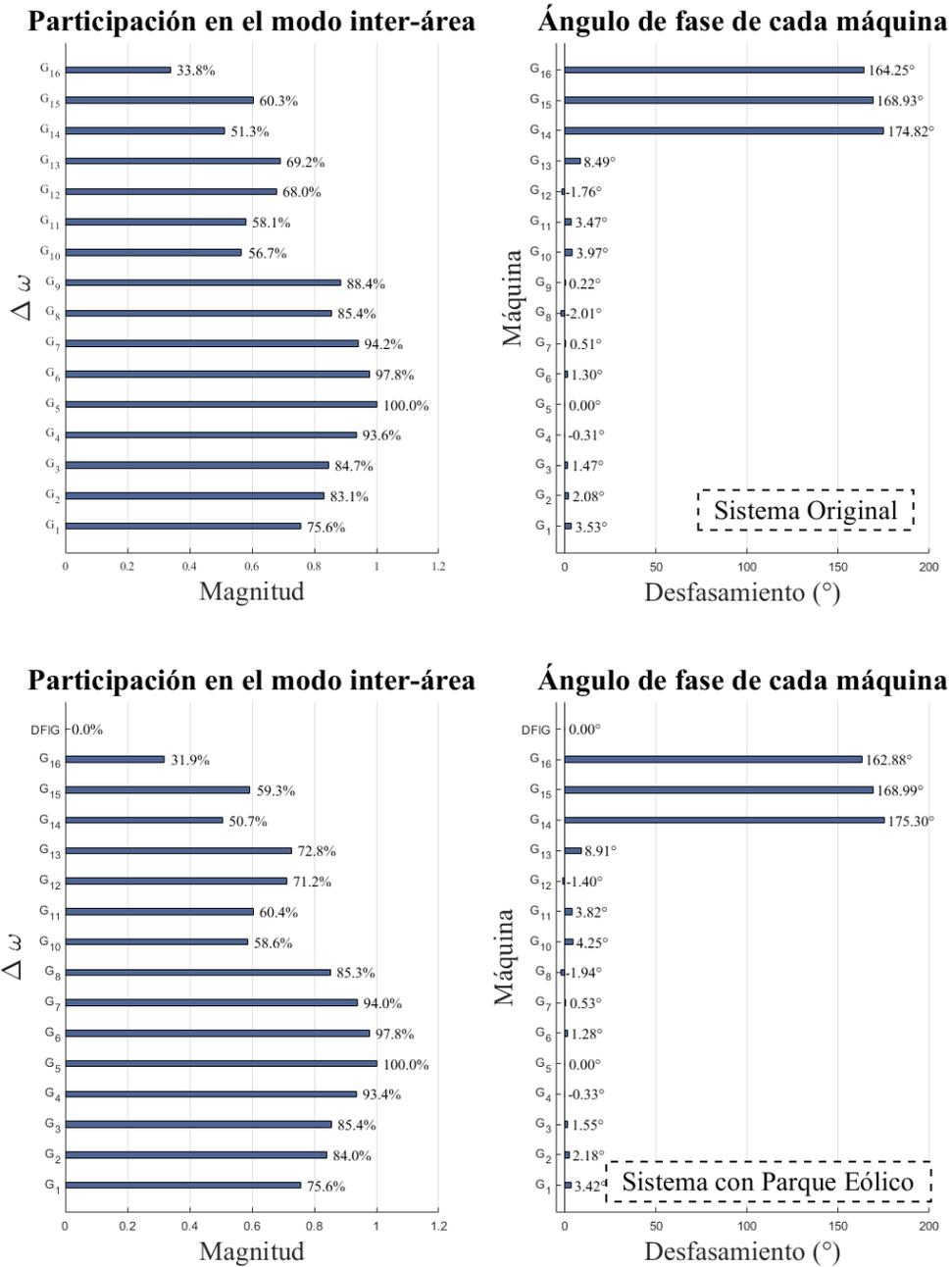
Finalmente, se realiza el análisis comparativo de los factores de participación y las estructuras espaciotemporales del sistema analizado. Al realizar la descomposición en valores propios de la matriz planta A, definimos primero los vectores propios derechos, denotados como  $v_i$ . Después, la magnitud  $|v_i|$ , nos proporciona una medida de participación de las variables de estado en los modos de oscilación. Por otra parte, los ángulos de cada uno de los elementos del vector  $v_i$  nos muestran el desfase de las variables respecto al modo número  $i$  (Kundur, 1994).

Estas estructuras espaciales de los modos son de particular interés en los estudios electromecánicos, ya que nos permiten identificar cómo se distribuye la energía en todo el sistema, y cuáles generadores interactúan con cuáles otros, intercambiando energía. Esta información se puede utilizar posteriormente para el diseño o ajuste de controles.

Para estudiar cómo se modifican estas estructuras espaciales cuando se sustituye un generador síncrono con un parque eólico, analizaremos el sistema de estudio en su forma base y en su forma modificada. Para estas comparaciones, tomaremos el modo inter-área del sistema original, el cual es el de mayor preocupación. Analizando únicamente la aportación de las velocidades angulares de cada generador, en las gráficas (a) y (c) de la Figura 16, se puede observar que todos los generadores tienen participación en este modo, además de que el generador número 5 es el que tiene la participación dominante.

El ángulo de oscilación de cada uno de los generadores lo podemos observar en las gráficas (b) y (d) de la misma figura. De estas gráficas, vemos que los generadores 1 a 13 tienen un ángulo cercano a cero, en tanto que los generadores 14 a 16 tienen un ángulo cercano a  $180^\circ$ , lo que nos indica que este segundo grupo de generadores está oscilando en contrafase respecto al primer grupo de generadores.

Aunque algunos valores cambiaron ligeramente al añadir el parque eólico, podemos observar que el comportamiento de los generadores sigue el mismo patrón que en el sistema original, los generadores 1 a 13 están oscilando en contrafase respecto a los generadores 14 a 16. Por otro lado, también se observa que la participación del parque eólico en este modo es nula, debido a que la velocidad angular de los generadores DFIG está desacoplada de la red eléctrica por medio de convertidores basados en electrónica de potencia.



**Figura 16.** Estructura espaciotemporal del modo de oscilación inter-área. (a) Magnitud, sistema original; (b) Fase, sistema original; (c) Magnitud, sistema con parque eólico; (d) Fase, sistema con parque eólico.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se abordaron los antecedentes y problemas a los que se enfrenta usualmente un sistema eléctrico de potencia ante la inclusión de parques eólicos. El modelo de turbina eólica seleccionado fue el del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), cuyo modelo fue descrito e integrado a un sistema eléctrico de potencia, resultando en un modelo no lineal bastante complejo.

Con el objetivo de obtener un modelo lineal de dicho sistema no lineal, que sea preciso y extensible a sistemas eléctrico de gran tamaño, se aplicó la linealización recursiva (LR), y se comparó contra los métodos de linealización convencionales, demostrando ser el método de linealización más preciso

y menos demandante computacionalmente. Para el caso de aplicación usado, la LR requirió aproximadamente el 85% del tiempo computacional de la aproximación por diferencias hacia adelante (ADA) y menos de la mitad respecto a la aproximación por diferencias centrales (ADC). Además, el error de la RL en términos brutos siempre rondó el error por punto flotante del software MATLAB.

Posteriormente, el modelo lineal obtenido se utilizó para evaluar los efectos de la sustitución de un generador síncrono por un parque eólico, ambos inyectando 800 MW a la red eléctrica, sobre las dinámicas electromecánicas. Esta potencia es bastante considerable, ya que representa el 4.35% de la potencia real total producida en el sistema. Los resultados demostraron cambios muy ligeros tanto en las características de los valores propios, como en las correspondientes estructuras espaciotemporales de las dinámicas electromecánicas, validando el modelo lineal del parque eólico. Se debe resaltar que el objetivo de este trabajo no fue el estimar un porcentaje máximo de penetración de energías renovables. Un punto muy interesante fue la confirmación del desacoplamiento entre las dinámicas electromecánicas y el DFIG debido al uso de dispositivos de electrónica de potencia.

Además, se pudo observar la inclusión de un modo inestable debido al DFIG, el cual está relacionado a la falta de modulación de la potencia de entrada de los generadores, por lo cual se puede concluir que para tener estudios más confiables se deben modelar dichos sistemas de control cuando se cuenten con parques eólicos.

Una cuestión importante que resaltar es que, en el análisis realizado, no se tomaron en cuenta las posibles variaciones de viento que pueden presentarse en la granja eólica, lo cual también puede afectar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

Como propuestas de investigación futura se encuentran dos puntos principales: la inclusión de más modelos dentro de la representación del sistema de potencia, tales como cargas no lineales, motores de inducción, compensadores estáticos de VARs, parques fotovoltaicos y otros parques eólicos. En segundo lugar, la extensión de las reglas de linealización recursiva de orden superior para el análisis de sistemas con integración de parques eólicos con el objetivo de estudiar posibles interacciones modales o interacciones entre lazos de control.

## Referencias

- Anaya-Lara, O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P., & Hughes M. (2009) *Wind Energy Generation, Modelling, and Control*. John Wiley & Sons.
- Chethan, M., & Ravi, K. (2024) Virtual Inertia Support for Renewable Energy Integration: A Review. *IEEE Access*. Early Access. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416694.
- Du, S., Ding, T., Xiao, Y., Wan, J., Liu, J., & Meng, F. (2024) Real-Time Scheduling of High-Penetrated Renewable Power Systems: An Expert Knowledge and Reinforcement Learning Hybrid Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 10.1109/TPWRS.2024.3423381.
- Gautam, D., Vittal, V., & Harbour, T. (2009). Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. *IEEE Transactions on power systems*, 24(3), 1426-1434. doi:10.1109/TPWRS.2009.2021234.
- Gill, P. E., Murray, W., & Wright, M. H. (2019). *Practical optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Hernández-Ortega, M.A. & Román-Messina, A. (2020). Recursive Linearization of Higher-order for Power System Models. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(2), 1206-1216. doi:10.1109/TPWRS.2020.3014593.
- Hernández-Ortega, M.A., Chakraborty, A., & Román-Messina, A. (2021). Hernández-Ortega, M.A. & Román-Messina, A. (2020). Sparse Nonlinear Wide-Area Control using Perturbed Koopman Mode Analysis. 2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC).

- 10.1109/CDC42340.2020.9304319.
- Hou, Q., Du, E., Zhang, N., & Kang, C. (2020). Impact of High Renewable Penetration on the Power System Operation Mode: A Data-Driven Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 731-741. doi: 10.1109/TPWRS.2019.2929276.
- IEEE Power Engineering Society. (2006). Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
- Kar, J., Chakraborty, A. (2021) Scalable design methods for online data-driven wide-area control of power systems. *IET Generation, Transmission, and Distribution*, 15(14), 71–79. doi: 10.1049/gtd2.12159.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Lee, S. H., Choi, D., Park, J.-W. (2021) Power-Sensitivities-Based Indirect Voltage Control of Renewable Energy Generators With Power Constraints. *IEEE Access*, 9, 101655-101664. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3097350.
- Molina-Pineda, S. (2021). Obtención del Modelo Lineal de un Parque Eólico Utilizando la Linealización Recursiva (Tesis de Licenciatura Ingeniería Mecánica y Eléctrica). Universidad Autónoma de Guadalajara.
- Persson, J., & Söder, L. (2008). Comparison of three linearization methods. In *PSCC2008, 16: th Power System Computation Conference*. Glasgow, Scotland. July 14-18, 2008. Power Systems Computation Conference (PSCC).
- Rogers, G. (2000). *Power Systems Oscillations*. Springer US.
- Roy, N. K., Islam, S., Podder, A. K., Roy, T. K., & Mueen, S. M. (2022) Virtual Inertia Support in Power Systems for High Penetration of Renewables—Overview of Categorization, Comparison, and Evaluation of Control Techniques. *IEEE Access*, 10, 129190-129216. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3228204.
- Secretaría de Energía. (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2024 - 2038). <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038>
- Singh, A. K., & Pal, B. C. (2013). Report on the 68-bus, 16-machine, 5-area system. IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls.
- Sun, H., Zhao, B., Xu, S., Lan, T., Li, Z., & Wu, P. (2024) Test Models for Stability/Security Studies of AC-DC Hybrid Power Systems with High Penetration of Renewables. *IEEE Transactions on Power Systems*.1109/TPWRS.2024.3408423.
- Tian, T., Kestelyn, X., Thomas, O., Amano, H., Messina, A.R. (2018) An Accurate Third-Order Normal Form Approximation for Power System Nonlinear Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 2128-2139. doi: 10.1109/TPWRS.2017.2737462.
- Tumiran, Putranto, L. M., Sarjiya, & Pramono E. Y. (2021) Maximum penetration determination of variable renewable energy generation: A case in Java-Bali power systems. *Renewable Energy*, 163, 561-570. doi: 10.1016/j.renene.2020.08.048.
- Tummala, A. S.L.V., Inapakurthi, R., & Ramanarao, P. V. (2018). Observer based sliding mode frequency control for multi-machine power systems with high renewable energy. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(3), 473-481. doi: 10.1007/s40565-017-0363-3.
- Ugalde-Loo, C. E., Ekanayake, J. B., & Jenkins, N. (2012). State-space modeling of wind turbine generators for power system studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(1), 223-232. doi: 10.1109/TIA.2012.2228836.
- Wang, Y., Xu, S., Sun, H., & Shen, C. (2024) Stability Boundary of Power System with Converter Interfaced Generation: Evolution and Transition Point. *IEEE Transactions on Power Systems*.10.1109/TPWRS.2024.3410321.
- Wu, Q. -H., Bose, A., Singh, C., Chow, J. H., Mu, G., Sun, Y., Liu, Z., & Liu, Y. (2023) Control and Stability of Large-scale Power System with Highly Distributed Renewable Energy Generation:

Viewpoints from Six Aspects. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 9(1), 8-14. doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.08740.

Zeinali Davarani, R., Ghazi, R., & Pariz, N. (2014). Non-linear analysis of DFIG based wind farm in stressed power systems. IET Renewable Power Generation, 8(8), 867-877. doi: 10.1049/iet-rpg.2013.0149

Zhu, H., Li, H., Liu, G., Ge, Y., Shi, J., Li, H., & Zhang, N. (2023). Energy Storage in High Variable Renewable Energy Penetration Power Systems: Technologies and Applications. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 9(6), 2099-2108. doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.00090.

# Estimación de inercia en sistemas eléctricos con paneles fotovoltaicos a partir de señales de voltaje simuladas en EMTP

## Inertia estimation in electric power systems with photovoltaic parks through the use of simulated voltage signals from EMTP

Saúl Eliab Meza Ronquillo<sup>a</sup>, Marcos Alfredo Hernández Ortega<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Programa de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Guadalajara; saul.meza@edu.uag.mx, eliab\_gasparin@hotmail.com

<sup>b</sup> Departamento de Electromecánica, Universidad Autónoma de Guadalajara; marcos.hernandez@edu.uag.mx

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

El creciente número de centrales de generación de energía eléctrica basadas en energías renovables y su conexión con la red a través de dispositivos de electrónica de potencia ha provocado la aparición de nuevas problemáticas en el diseño, operación y control de los sistemas eléctricos de potencia. Uno de los fenómenos que más comúnmente ocurren es la disminución de la inercia total del sistema. El efecto de esta disminución se ve reflejada en una variación más grande de la frecuencia del sistema cuando es sujeto a perturbaciones de potencia debidas a pérdidas de potencia en generación o carga. En este artículo, un sistema eléctrico de potencia compuesto por diversos generadores síncronos y un parque fotovoltaico es simulado en el programa EMTP para obtener señales de voltaje trifásico similares a las mediciones de las unidades de medición fasorial en sistemas de potencia reales. Se propone, además, un método para obtener señales de frecuencia con base en los voltajes trifásicos medidos y su utilización para la estimación de la inercia global del sistema. El método propuesto se aplica al sistema de 2 áreas, 4 máquinas y un parque fotovoltaico, donde éste último inyecta el 5% de la potencia real del sistema. Los generadores síncronos son representados con detalle y equipados con excitadores y gobernadores. Los resultados muestran que el método propuesto funciona de buena manera, proporcionando estimaciones de la inercia global que varían acorde al porcentaje de penetración de energía renovable. Comparaciones de las estimaciones con y sin parque fotovoltaico son puntualizadas, así como se proporcionan los principales puntos a resolver en trabajos futuros.

**Palabras clave:** energías renovables, inercia del sistema, parques fotovoltaicos, variaciones de frecuencia.

### ABSTRACT

The growing number of electrical power plants based on renewable energy and their interconnection to the power grid through power electronics devices has derived into the appearance of new issues in the design, operation, and control of the electric power systems. One of the most commonly observed phenomena in power systems with penetration of renewable energy is the decrease of the total system inertia. The effect of such an inertia decrease is reflected as a higher variation in the



|              |   |
|--------------|---|
| $t_{nadir}$  | Instante de tiempo donde se alcanza $f_{nadir}$ .                                   |
| $t_{zenith}$ | Instante de tiempo donde se alcanza $f_{zenith}$ .                                  |
| $V'_{POI}$   | Voltaje de referencia del inversor fotovoltaico.                                    |
| $V^+_{POI}$  | Voltaje de secuencia positiva en el POI.  |
| $V_T$        | Voltaje en terminales del generador síncrono.                                       |
| $x_1, x_2$   | Valor en las abscisas de dos puntos de una línea recta.                             |
| $X_L$        | Reactancia equivalente de línea.  |
| $y_1, y_2$   | Valor en las ordenadas de dos puntos de una línea recta.                            |
| $z_k$        | Instante de tiempo donde ocurre el cruce por cero número $k$ de una señal senoidal. |
| $\delta$     | Ángulo de potencia del generador síncrono.  |
| $\Delta P$   | Diferencia de potencia activa que es conectada o desconectada durante un disturbio. |
| $\omega_0$   | Frecuencia angular síncrona.  |

## 2. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia son sistemas no lineales de gran dimensión y complejidad, los cuales se extienden por miles de kilómetros y manejan enormes cantidades de energía. Una parte muy importante de su manejo y operación es la estimación de su estabilidad ante disturbios como fallas trifásicas, pérdida de generador o pérdida de carga, por ejemplo (Grainger, 1996).

Sin embargo, la estimación de la estabilidad en estos sistemas depende del tipo de análisis y disturbios que se consideran. Por un lado, la estabilidad de pequeña señal es útil para estimar cómo se comportará el sistema ante pequeños disturbios. Sin embargo, normalmente esta estimación consiste en una aproximación lineal de la respuesta completa por lo que, ante ciertas condiciones tales como una operación con alto estrés, grandes disturbios, y la presencia de elementos altamente no lineales, puede ser poco exacta. En dichos casos, es necesario evaluar la respuesta no lineal del sistema. Este proceso es conocido como análisis de estabilidad transitoria (Kundur, 2022), (Rogers, 2000).

Dentro de este estudio, la estabilidad de la frecuencia es una parte fundamental y está caracterizada en gran medida por la respuesta inercial del sistema al amortiguar los cambios de frecuencia al comienzo de un desequilibrio repentino de carga/generación. En este periodo transitorio, la respuesta de los generadores síncronos se hace presente y, por lo tanto, ayuda a mantener la estabilidad de frecuencia (Hartmann, 2019), (Porretta, 2020).

Ahora bien, los sistemas eléctricos de potencia actuales contienen un cada vez mayor porcentaje de penetración de energías renovables, tales como parques fotovoltaicos y parques eólicos, pudiendo en el futuro incluir cargas/fuentes debidas a la conexión de vehículos eléctricos (Tan, 2020). La mayoría de estos sistemas de generación basados en energías renovables son conectados a la red por medio de dispositivos de electrónica de potencia, los cuales son altamente no lineales y pueden aislar las dinámicas de las fuentes renovables de las dinámicas del resto del sistema, por lo que es recomendable realizar la evaluación de su estabilidad por medio de estudios transitorios, (Hartmann, 2019). Adicionalmente, se ha reportado en literatura que la conexión de dispositivos a través de electrónica de potencia afecta negativamente la respuesta inercial de los sistemas de potencia.

De forma tradicional, la inercia total del sistema se basa en la inercia individual proporcionada por cada uno de los generadores síncronos, la cual crea una conexión física directa con la red, proporcionando así energía instantánea cuando sea necesario y pudiendo ayudar a frenar las desviaciones de frecuencia creadas por bruscos desequilibrios de potencia (Inoue, 1997). Entonces, a mayor inercia, más estable será el sistema cuando se presenten estos desequilibrios. Sin embargo, cuando fuentes como parques eólicos y parques fotovoltaicos son conectados a la red, estos no

aportan ninguna inercia a la respuesta transitoria del sistema, ya sea por la ausencia total de esto o por estar eléctricamente aislados debido a la electrónica de potencia (Porretta, 2020).

Aunando en esto, la energía producida por fuentes fotovoltaicas ha presentado la mayor tasa de crecimiento anual entre las energías renovables en todo el mundo, pasando del 0.6% en 2013 al 5.4% en 2023 (IEA, 2023). En México, el porcentaje de energía eléctrica producida por fuentes renovables cada vez va aumentando más: la producción neta en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) durante 2022 fue de 340,712 GWh, de los cuales el 31.2% fue producida energías limpias. De este porcentaje, el 24.51% pertenece a energía producida por fuentes fotovoltaicas (SENER, 2023). Posteriormente, en el año 2023 la producción total de energía fue de 351,695 GWh, de los cuales el 6.64% fue producida por fuentes fotovoltaicas (5.16% de solar fotovoltaica y 1.48% de generación distribuida fotovoltaica) (SENER, 2024).

Otro factor importante es que la eficiencia de las celdas fotovoltaicas se ha incrementado 5 veces en los últimos años, permitiendo así que la generación mundial de electricidad con energía fotovoltaica haya crecido un 10%. Los costos y la cantidad de energía necesaria para su fabricación también se han reducido, de tal manera que la inversión de los proyectos se puede recuperar en 2 años y la confiabilidad y las garantías que otorgan son muy altas. Por ello, el potencial de las fuentes fotovoltaicas es muy amplio y es importante analizar la manera de incorporarlas al sistema eléctrico de la mejor manera (Hartmann, 2019).

Debido a lo anterior, y a la cada vez mayor presencia de elementos de medición en tiempo real (Phasor Measurement Units – PMUs), es de gran pertinencia la aplicación de técnicas de monitoreo de la estabilidad de los sistemas eléctricos que permitan establecer cómo se ve modificada la inercia del sistema ante diferentes niveles de penetración de energías renovables. Así mismo, dicha estimación puede ser utilizada para evaluar la confiabilidad del sistema, predecir márgenes de estabilidad y establecer medidas de prevención de apagones ante grandes fallas (Carrasco, 2016). Sin embargo, existe una gran dificultad en este punto, conformada principalmente por tres situaciones:

- La estimación de inercia de un sistema eléctrico de potencia (SEP) real requiere tener información de sus componentes, así como mediciones en tiempo real de la frecuencia, o de algún otro tipo de señal que pueda ser utilizada para estimar la frecuencia. No obstante, debido a la importancia estratégica de los sistemas eléctricos de potencia, es muy difícil tener acceso a esta información.
- Si se tiene acceso a la información anterior, se puede aplicar un método de estimación de inercia para el caso que se presentó; pero sería imposible realizar pruebas para diferentes casos con el objetivo de evaluar su precisión o para observar cómo se modifica la inercia gradualmente.
- La otra opción es utilizar un programa de simulación que permita realizar las pruebas necesarias. No obstante, dicho programa debe ser capaz de modelar con el detalle suficiente el SEP para garantizar que las señales de respuesta obtenidas son lo más semejantes posible a las que se tendrían en la realidad.

Debido a lo anterior, en este artículo se propone una metodología para realizar la estimación de inercia en SEPs en un ambiente de simulación muy similar a la realidad. Para ello, se utilizará el programa EMTP, un programa de simulación que es capaz de proporcionar señales similares a las provistas por un PMU (Jiang, 2002). Bajo este esquema, es viable la simulación de sistemas eléctricos de potencia con energías renovables y con varios casos de análisis para la estimación de inercia en ambientes similares a la realidad.

### 3. Aproximaciones para la estimación de la inercia

A continuación, se presenta la idea general de la inercia total de un sistema de potencia, además de los métodos de estimación de inercia más usados en la literatura.

### 3.1 Inercia de un sistema convencional

La inercia total de un sistema eléctrico de potencia convencional se compone principalmente de la energía cinética almacenada en las masas rotatorias de los generadores síncronos, y de una pequeña contribución de las cargas sensibles a los cambios en la frecuencia (principalmente grandes motores de inducción en la industria) (Inoue, 1997), (Porretta, 2020).

La gran importancia de la energía cinética almacenada en las masas rotatorias de los generadores reside en el hecho de que, cuando ocurre alguna falla que provoca un desbalance parcial de energía, dicha energía cinética actúa como un amortiguador para evitar grandes variaciones en el suministro eléctrico.

Ahora veamos esto en términos matemáticos. Para ello, primero se considerará un generador síncrono conectado a un equivalente de red, tal como se muestra en la Figura 1, donde  $X_L$  es la reactancia equivalente entre el voltaje interno del generador,  $E \angle \delta$ , y el voltaje en las terminales del equivalente de red,  $V_T \angle 0^\circ$ . En el diagrama de la Figura 1, el equivalente de la red se asume con un voltaje y frecuencia que son constantes. El ángulo del voltaje interno del generador síncrono es medido entonces respecto al voltaje del equivalente de red y denotado como  $\delta$ .

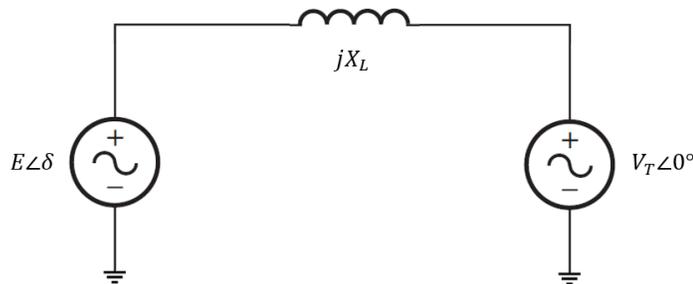


Figura 1. Esquema de un generador conectado a un equivalente de red.

Entonces, siguiendo a (Kundur, 2022), la potencia máxima  $P_{Max}$  que el generador puede transmitir a través de la reactancia  $X_L$  está dada como:

$$P_{Max} = \frac{E_A V_T}{X_L} \quad (1)$$

Después, la potencia eléctrica que produce el generador está dado como:

$$P_e = P_{Max} \text{sen } \delta \quad (2)$$

Por otra parte, el primo motor que mueve al generador le provee potencia mecánica, la cual se convierte en potencia eléctrica al modificar el valor del ángulo  $\delta$ , cuya dinámica está dada por la ecuación de oscilación:

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (3)$$

donde  $J$  es el momento de inercia de la máquina,  $T_m$  es el par mecánico de entrada y  $T_e$  es el par eléctrico que entrega el generador. La ecuación (3) se suele expresar en términos de la constante de

inercia  $H$  de la máquina de la siguiente manera:

$$H \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{1}{2} \omega_0 (P_m - P_e) \quad (4)$$

donde  $P_m$  es la potencia mecánica suministrada al generador y  $\omega_0$  es la frecuencia angular síncrona.

De las ecuaciones (3) y (4), se puede notar que la constante de inercia se puede determinar por medio de la siguiente expresión:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_0^2}{S_B} \quad (5)$$

con  $S_B$  siendo la potencia base del generador.

Esta constante de inercia  $H$  es preferida para representar la inercia de la máquina síncrona, y representa cuanto tiempo (en segundos) la energía almacenada en la máquina puede suplir una carga igual a la potencia nominal del generador. También representa la resistencia del generador a presentar cambios en la frecuencia debido a un desbalance carga/generación (Inoue, 1997).

Extendiendo lo anterior para un sistema de potencia que tiene  $n$  generadores síncronos conectados a través de los transformadores y las líneas de transmisión, la inercia total o inercia agregada de los generadores se puede calcular por medio de la ecuación (6) siguiente:

$$H_{sist} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j H_j}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (6)$$

donde  $H_{sis}$  es la inercia total del sistema, y los términos  $H_j$  y  $S_j$  representan la constante de inercia y la potencia nominal del generador número  $j$ .

Esta es la primera aproximación para el cálculo de la inercia total del sistema, aunque se ha asumido que solo se tienen conectados generadores síncronos descritos solo por sus ecuaciones de oscilación como la ecuación (4) (Inoue, 1997).

### 3.2 Estimación de la inercia del sistema a través de la frecuencia de la red

Una segunda aproximación se basa en estimar la inercia del sistema en base a mediciones de la frecuencia de la red. Este método es más robusto, ya que no requiere un modelado específico de los generadores y puede ser utilizado sobre señales medidas durante diversos disturbios.

Este método se basa en la estimación de la tasa de cambio de la frecuencia, mejor conocida como RoCoF por sus siglas en inglés (Rate of Change of Frequency). Esta tasa de cambio suele ser máxima en los primeros instantes después de un disturbio y depende directamente de la magnitud de la perturbación experimentada y de la inercia del sistema (Zografos, 2018).

Para aplicar este concepto a un sistema de potencia con varios generadores, retomamos la ecuación de oscilación de una máquina síncrona, ecuación (4), centrándonos en el generador  $j$ -ésimo, y expresándola en términos de frecuencia en Hz, resultando en:

$$\frac{2H_j}{f_0} \frac{df_j}{dt} = \frac{P_{mj} - P_{ej}}{S_j} \quad (7)$$

La ecuación (7) muestra que un desbalance entre las potencias eléctrica y mecánica se traducirá en un cambio en la frecuencia. Entonces, el RoCoF del generador  $j$  justo después de un disturbio estará determinado por el desbalance en potencia ( $P_{m_j} - P_{e_j}$ ) y la constante de inercia  $H_j$ . Como se puede deducir, la RoCoF estimada será distinta para cada generador, dependiendo de su propia inercia y el cambio en potencia eléctrica que percibe en sus terminales. Esta ecuación se puede extender a un contexto multi máquina al considerar la frecuencia del centro de inercia  $f_{CDI}$ , definida como

$$f_{CDI} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (8)$$

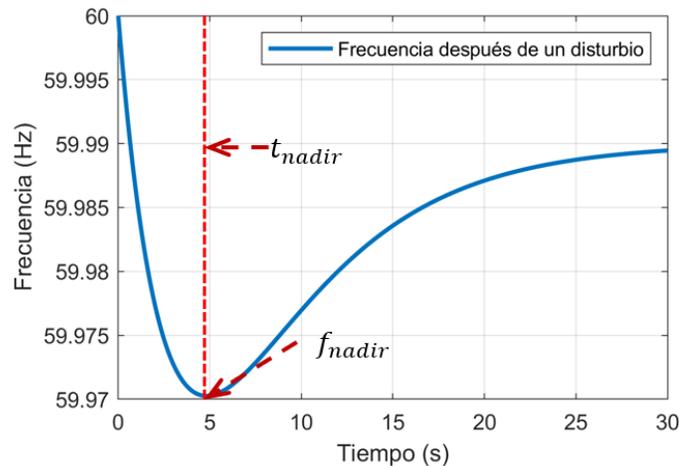
la cual representa la frecuencia ponderada promedio de todo el sistema.

Al usar la definición (8), entonces la ecuación del RoCoF del sistema se propone como

$$\frac{2H_{sis}}{f_0} \frac{df_{CDI}}{dt} = \frac{P_m - P_e}{S_{sis}} \quad (9)$$

donde  $P_m - P_e$  engloba el desbalance total de potencia que ocurre en el sistema, y  $S_{sis}$  representa la potencia compleja total del sistema.

Una vez que la frecuencia del centro de inercia ha sido calculada, se obtiene una curva como la que se ilustra en la Figura 2, donde se pueden definir varios parámetros importantes: frecuencia antes del disturbio, frecuencia instantánea máxima ( $f_{zenith}$ ) o mínima ( $f_{nadir}$ ) después del disturbio, máxima desviación de frecuencia y tiempo para alcanzar el valor máximo/mínimo de desviación de frecuencia ( $t_{nadir}$  o  $t_{zenith}$ ).



**Figura 2.** Indicadores de la respuesta inercial de un sistema.

Un punto crítico para obtener una buena estimación de la inercia del sistema es una buena identificación del tiempo de inicio del disturbio. Este tiempo se puede calcular como el tiempo en el cual el valor instantáneo de la RoCoF excede un cierto límite.

En general, este método es muy utilizado, aunque existe el reto técnico de cómo obtener todos los datos necesarios para calcular la inercia del sistema

### 3.3 Métodos de estimación en la literatura

En general, existen dos tipos de estimaciones de inercia: métodos fuera de línea y métodos en línea.

Como su nombre lo indica, los métodos fuera de línea son usados de forma asíncrona a la operación del sistema, cuando algún evento ya ha ocurrido y se cuenta con las mediciones y datos del sistema durante el mismo. En contraste, los métodos en línea son utilizados para estimar la inercia del sistema en tiempo real al utilizar mediciones en el sistema. En ambos tipos de métodos, la estimación de inercia es todo un reto cuando existen fuentes de energías renovables. En literatura existen muchas propuestas para la estimación de inercia. A continuación, se mencionan algunas de las más relevantes (Tan, 2022).

Algunos trabajos que solo consideran generadores síncronos en las redes eléctricas utilizadas son los siguientes: Un método de estimación de inercia basado en la máxima desviación de frecuencia es propuesto en (Wang, 2021), donde, a partir de la estimación de la energía de soporte inercial, se estima la inercia sin necesidad de calcular la RoCoF. Por otro lado, en (Zografos, 2018) los autores si utilizan la RoCoF, pero incluyen los efectos del cambio de voltaje y frecuencia en la potencia entregada a las cargas del sistema. En (Wang, 2024), se propone un método para estimar la inercia y la constante de amortiguamiento de sistemas de potencia por medio del método de mínimos cuadrados en ventanas deslizantes, usando datos medidos y capaz de calcular cambios de inercia ante dos o más fallas.

Dos referencias que resaltan en este campo son (Cai, 2019) y (Wang, 2022), donde la respuesta de los modos electromecánicos es usada para estimar la inercia total del sistema con la ecuación de oscilación en el dominio de la frecuencia.

En los siguientes artículos, algunas fuentes de energía renovables sí son consideradas y la inercia es estimada con éxito: En (Makolo, 2021), se utiliza una estrategia recursiva basada en mínimos cuadrados para estimar la inercia en línea de una red eléctrica, usando mediciones. Sin embargo, en esta propuesta las mediciones son usadas para estimar un sistema equivalente y después la inercia es calculada en una forma similar a la ecuación (8).

En (Gotti, 2024), se propone un método en línea para la estimación de la inercia de un área haciendo una identificación de sistema con el error de ecuación iterativo. En esta propuesta, la técnica de divisor de frecuencia (Frequency Divider – FD propuesto en (Milano, 2017)) es usada para estimar la frecuencia de cada unidad generadora, después se identifican áreas coherentes y posteriormente se calcula la inercia de cada área coherente.

En (Li, 2024), datos ambientes de mediciones de frecuencia son usados para estimar la inercia de una microrred. Un punto sobresaliente de esta propuesta es que permite el cálculo de la inercia total de la microrred sin necesidad de la existencia de algún disturbio.

Desde otra perspectiva, en (Mazidi, 2023) se propone una metodología en línea para estimar la inercia de generadores síncronos, pero también la participación inercial de fuentes de energía renovable conectados a la red. En ese mismo sentido, la inercia individual de cada una de estas fuentes de energía renovable es estimada en (Tan, 2024) con el uso de filtros de Kalman adaptivos.

Recientemente, el uso de la inteligencia artificial para la estimación de inercia también ha sido explorado: En (Linaro, 2023), se dan algunos avances en la utilización de redes neuronales para estimar la inercia en sistemas eléctricos de potencia con penetración de energías renovables. En (Poudyal, 2022), el Federated learning (una variante de aprendizaje máquina) es usado para, a través de un esquema cliente-servidor, estimar la inercia de un sistema multi área en condiciones de variaciones estocásticas de energía. En (Tuo, 2023), se presentan dos propuestas basadas en aprendizaje máquina que pueden estimar con gran precisión la inercia de sistemas eléctricos con energías renovables usando mediciones ambiente.

Una propuesta muy interesante es la presentada en (Best, 2021), donde los autores son capaces de

estimar la inercia en el sistema eléctrico de Irlanda a través de cambios en el flujo de potencia de una línea de alto voltaje en corriente directa (HVDC).

Otra propuesta de gran interés es la de (Molina-Pineda, 2023), donde se calcula una equivalencia de la frecuencia global del sistema, pero basada en centros de gravedad en lugar de centros de inercia.

Como se puede notar del análisis anterior, varias de las propuestas revisadas asumen que las señales de frecuencia están disponibles y realizan análisis a partir de ello. Otras tantas proponen métodos para estimar estas señales de frecuencia, aunque en su mayoría proponen métodos bastante complejos mientras que otro grupo propone nuevas alternativas para el cálculo de la inercia. En este artículo, se propone una metodología bastante simple para estimar las señales de frecuencia de los generadores síncronos y a partir de ellas aplicar el método clásico del centro de inercia. Esto se presenta en la Sección 5. A continuación, se describe el modelo de parque fotovoltaico que es utilizado en el programa EMTP.

#### 4. Integración de parques fotovoltaicos

##### 4.1 Modelo del EMTP

En la Figura 3 se muestra el circuito equivalente de parques fotovoltaicos que es utilizado en el programa EMTP, donde se le han añadido componentes nuevos al circuito equivalente de una celda solar convencional, como es el bloque de control que calcula la corriente de las células fotoeléctricas y la corriente que fluye a través del diodo (EMTP, 2020). El modelo completo del parque fotovoltaico se puede consultar en la documentación de EMTP (Karaagac, 2021) y las referencias ahí contenidas.

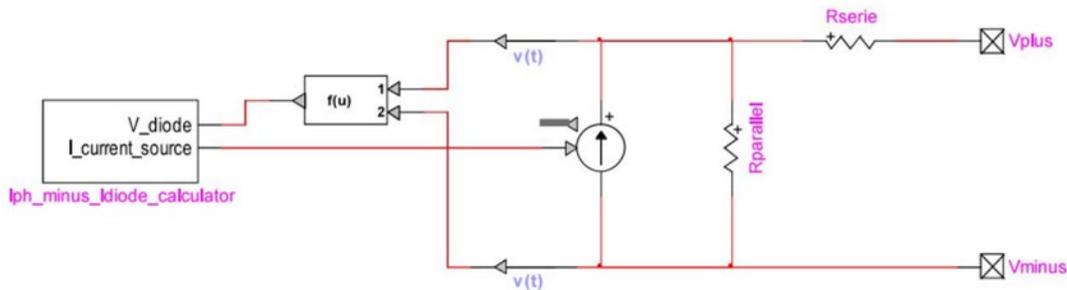


Figura 3. Circuito eléctrico equivalente de un parque fotovoltaico en EMTP (EMTP, 2020).

Como el diodo es un dispositivo no lineal, este se mueve dentro del bloque de control por lo que la fuente de corriente que se muestra en la Figura 3 representa la fuente fotoeléctrica en paralelo con el diodo. La corriente del diodo se resta de la corriente fotoeléctrica y la corriente resultante impulsa la fuente de corriente controlada que se ve en la Figura 3. En la Figura 4 se representa el circuito que se encuentra dentro del controlador, el cual calcula la corriente fotovoltaica en función de la irradiancia, y la corriente del diodo en función de la tensión del diodo. La irradiancia puede variar, pero la temperatura es constante durante toda la simulación (Karaagac, 2021).

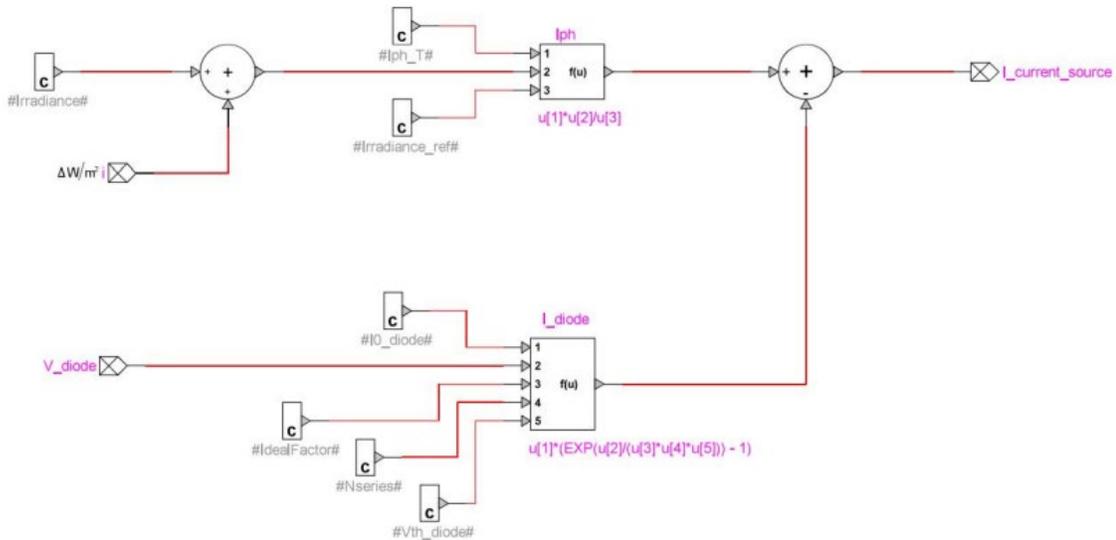


Figura 4. Circuito interno del controlador de corriente (EMTP, 2020).

## 4.2 Control de potencia reactiva en parques fotovoltaicos

La potencia activa en el punto de interconexión (POI, por sus siglas en inglés) depende de las condiciones climáticas, pero es necesario tener un controlador de parque fotovoltaico central (PVPC), de acuerdo con las condiciones actuales del código de red, para controlar la potencia reactiva en el POI. Este control de potencia reactiva funciona basado en el concepto de control de voltaje secundario. En el nivel primario, el controlador del inversor monitorea y controla su propio voltaje terminal de secuencia positiva, con un regulador de voltaje de terminales.

En cuanto al nivel de voltaje secundario, el PVPC monitorea la potencia reactiva en el POI ( $Q_{POI}$ ), y lo controla modificando los valores de referencia de voltaje de los inversores fotovoltaicos ( $V^+_{POI}$ ), a través de un regulador proporcional integral (PI) de potencia reactiva.

Cuando el valor referencia de  $Q_{POI}$  es función del voltaje, esto le permite al PVPC realizar acciones de control de voltaje y control del factor de potencia. Cuando el módulo PVPC está trabajando bajo la función de control  $V$ , la referencia de potencia reactiva en la Figura 18 ( $Q^+_{POI}$ ) se calcula mediante un control de voltaje proporcional externo dado como:

$$Q_{POI} = K_{V_{POI}}(V^+_{POI} - V^+_{POI}) \quad (10)$$

donde  $V^+_{POI}$  es el voltaje de secuencia positiva en el POI, y  $K_{V_{POI}}$  es la ganancia del regulador de voltaje.

Para más detalles acerca de estos módulos, se recomienda al lector revisar con detalle el manual de usuario del programa EMTP (EMTP, 2020).

## 5. Metodología propuesta

Es muy común que los métodos de estimación mencionados en la Sección 2 sean primero planteados en ambientes de simulación de sistemas eléctricos de potencia, donde su utilidad es probada, así como demostrada su posible aplicación para sistemas reales. Lo anterior se puede realizar a través de varios programas disponibles en el mercado, de entre los cuales se prefiere utilizar aquellos con un modelado más cercano a la realidad. Debido a esto, en este trabajo se planteó implementar una estrategia de estimación fuera de línea, la cual también puede ser utilizada para predecir la inercia

total de un sistema bajo diferentes porcentajes de penetración de energía solar.

El programa que se utilizó para el estudio de este trabajo es el simulador EMTP, el cual cuenta con una amplia biblioteca de componentes electromecánicos, eléctricos, electrónicos y de control para una simulación más completa y realista. Las señales obtenidas con el simulador son después procesadas por medio del programa Matlab para la implementación de una estrategia de estimación de inercia fuera de línea.

### 5.1 Consideraciones requeridas

En este trabajo se considerarán sistemas eléctricos de potencia simulados en el software EMTP. Con esto, se podrán obtener señales simuladas que puedan ser similares a las obtenidas en un sistema eléctrico real. Sin embargo, para que las señales obtenidas puedan ser utilizadas para estimar la inercia del sistema, existen algunas condiciones que se deben cumplir.

Primero, los generadores síncronos deben tener un modelado muy completo, de por lo menos 4 estados que contemple, además de las dinámicas electromecánicas, las dinámicas del voltaje interno del generador. Aunado a esto, para que en la respuesta del sistema en conjunto se pueda estimar la inercia, es necesaria la presencia de controles que hagan que el sistema tienda a regresar a un estado operativo estable y factible; es decir, se requiere modelar los sistemas de excitación y de control de potencia mecánica (gobernadores).

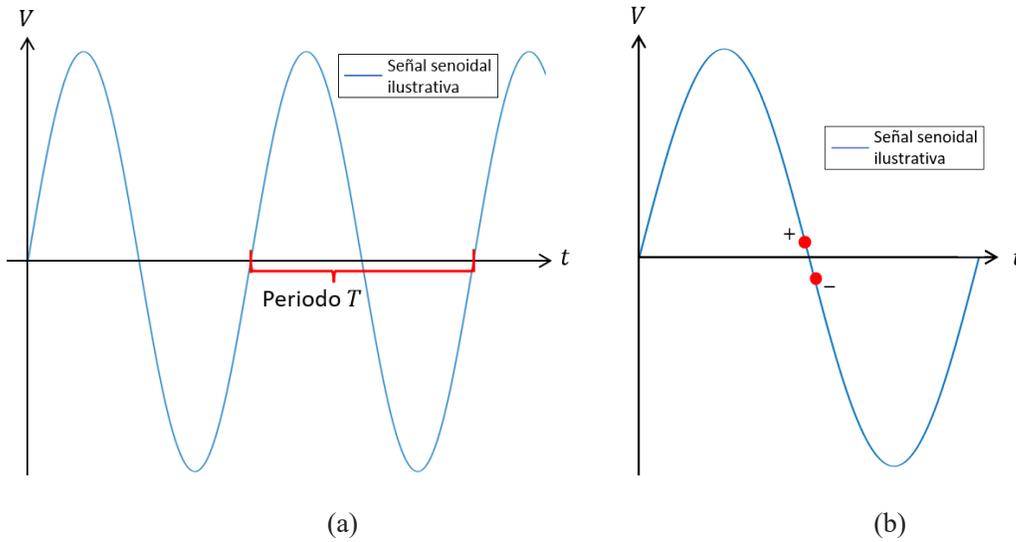
### 5.2 Estimación de la frecuencia del centro de inercia

Como se mencionó anteriormente, en cada nodo de conexión de los generadores síncronos se contará con mediciones de los voltajes trifásicos, los cuales continuarán siendo señales senoidales durante las perturbaciones a la red y los cuales se supondrán como señales estacionarias (de esperanza igual a cero). Para estimar la frecuencia de cada nodo del sistema, [se debe tomar](#) en cuenta que los voltajes son señales senoidales, las cuales, en condiciones estáticas tendrían una frecuencia dada por:

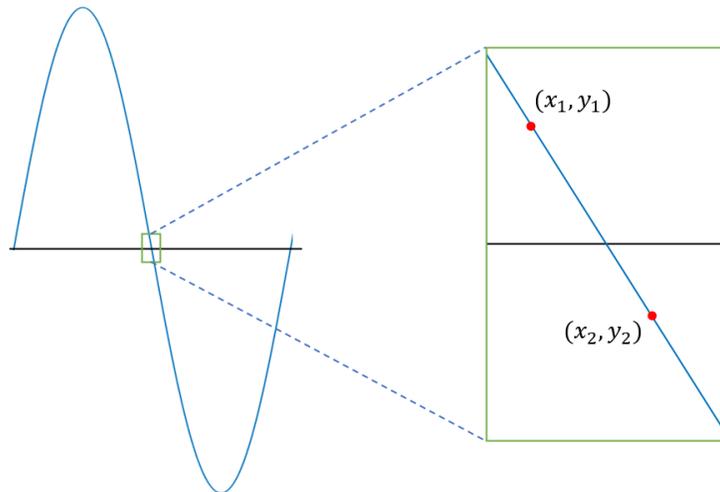
$$f = \frac{1}{T} \quad (11)$$

donde  $T$  es la duración en segundos de un ciclo completo, como se ilustra en la Figura 5(a).

En este contexto, se plantea la determinación del tiempo que transcurre entre cada cruce por cero de la señal de voltaje. Debido a que este proceso debe ser automático, se aprovecha la siguiente observación: El producto entre dos muestras contiguas de una señal senoidal es positiva si ambas están en el mismo semiciclo y negativa si entre ellas ocurrió un cambio de signo, como se ilustra en la Figura 5(b). No obstante, es posible que el cruce por cero de la señal medida no coincida exactamente con algunas de las muestras realizadas, por lo que se propone un ajuste del tiempo de cruce. Dicho método se basa en que, localmente, la forma senoidal se comporta como una línea recta, tal como se dibuja en la Figura 6.



**Figura 5.** (a) Ilustración de una señal senoidal y su periodo. (b) Signo de las muestras contiguas cuando existe un cruce por cero.



**Figura 6.** Comportamiento lineal de una señal senoidal alrededor de un cruce por cero.

De esta manera, la pendiente de la línea recta que une a los dos puntos ilustrados en la Figura 6 se puede calcular como:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (12)$$

Después, el valor exacto del cruce por cero puede ser obtenido al fijar  $y_0 = 0$  y despejando de la ecuación (12), resultando en la expresión:

$$x_0 = x_2 - \frac{y_2}{m} \quad (13)$$

El valor obtenido de la ecuación (13) será entonces guardado como el  $k$ -ésimo cruce por cero de la señal, denotado como  $t_k$ . De esta manera, el valor del semiperiodo de la señal comprendido entre los cruces  $z_k$  y  $z_{k-1}$  puede ser utilizado para calcular un valor de la frecuencia de la señal en ese periodo de tiempo,  $f_k$ , como sigue:

$$f_k = \frac{2}{(z_k - z_{k-1})} \quad (14)$$

Este proceso es repetido para todas las muestras que comprenden la señal medida. Los valores discretos de frecuencia  $f_j$  pueden ser utilizados para obtener una señal de frecuencia que cambia en el tiempo para cada voltaje de fase, obteniendo para el bus de conexión del generador  $j$  las señales  $f_{ja}$ ,  $f_{jb}$  y  $f_{jc}$ . La frecuencia del generador  $j$  es entonces determinada como el promedio de las tres fases. Esta frecuencia es local del generador  $j$ , por lo que puede contener algunas dinámicas oscilatorias locales, así como oscilaciones correspondientes al modo inter-área. Dichas oscilaciones son amortiguadas cuando se calcula la frecuencia del centro de inercia,  $f_{CDI}$ , usando la ecuación (8). Esta frecuencia  $f_{CDI}$  es después utilizada para la estimación de la inercia del sistema, como se describe más adelante.

### 5.3 Estimación del RoCoF y la inercia del sistema

Como ya se mencionó, el RoCoF es un valor muy importante para el análisis de la perturbación de una frecuencia cuando ésta ha sufrido un desbalance de carga o de generación, y en nuestro caso será un valor clave para determinar la inercia del sistema. La RoCoF es la derivada de la frecuencia global del sistema, denotada como:

$$RoCoF = \frac{df_{CDI}}{dt} = \frac{f_{CDI}(t_2) - f_{CDI}(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

donde  $f_{CDI}(t_1)$  y  $f_{CDI}(t_2)$  son los valores de la señal de frecuencia  $f_{CDI}$  en los instantes de tiempo  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente. Como se puede notar, se propone evaluar de manera manual la derivada numérica de la señal  $f_{CDI}$ . Esto debido a la posible presencia de ruido o discontinuidades en la señal que pueda dificultar la aproximación con polinomios o la derivación numérica automática.

También es de vital importancia conocer en qué momento preciso ha ocurrido el disturbio en el sistema para a partir de ese momento calcular la RoCoF. Este parámetro es muy sencillo de obtener en la propuesta realizada, ya que es fijada antes de la simulación.

Una vez que el valor de RoCoF ha sido estimado por medio de la ecuación (15), se procede a calcular la inercia total del sistema con la fórmula (16) de abajo, la cual ha sido obtenida a partir de la ecuación (9).

$$H_{sis} = \frac{f_0 \Delta P}{2(RoCoF)S} \quad (16)$$

En la expresión (16),  $S$  es la suma de las potencias nominales de todos los generadores conectados a la red,  $f_0$  es el valor del vector de frecuencias  $f_{CDI}$  justo antes de que se aplique la perturbación, mientras que  $\Delta P$  es el valor de potencia activa que se ha perdido ya sea en carga o en generación.

Para resumir de una forma más explícita la metodología propuesta, en el Algoritmo 1 mostrado a continuación se presenta el proceso para la medición de la inercia  $H_{sis}$ .

---

Algoritmo 1. Proceso para calcular la inercia  $H_{sis}$

---

1. Generar un sistema en EMTP y aplicar una pérdida de carga  $\Delta P$  después de 1 segundo.
  2. Obtener las mediciones de voltajes de terminales en los puntos de interconexión de las fuentes de energía.
  3. Para cada señal de voltaje, evaluar la función  $v_k(t_i)v_k(t_{i-1})$  para encontrar entre qué par de
-

señales se encuentra un cruce por cero, como se ilustra en la Figura 6.

4. Con los valores identificados en el punto anterior, calcular cada uno de los puntos de cruce por cero con la ecuación (13).
5. Con la ecuación (14), calcular los valores de frecuencia  $f_k$  que se tienen entre los puntos  $v_k(t_i)$  y  $v_k(t_{i-1})$ . Con ellos, formar una señal de frecuencia para cada unidad generadora.
6. Aplicar la ecuación (8) para obtener la señal  $f_{CDI}$ .
7. En los primeros instantes después de la falla calcular la RoCoF por medio de (15).
8. Con los datos de la falla y el valor de RoCoF, calcular  $H_{sis}$  con (16).

La metodología descrita en este artículo puede ser aplicada a sistemas con o sin energías renovables conectadas. En la siguiente sección se aplicará la estrategia propuesta a un caso de estudio, mostrando los resultados obtenidos, así como los posibles puntos a mejorar en trabajos futuros.

## 6. Caso de Estudio y Resultados

### 6.1 Sistema de 2 áreas y 4 máquinas

Como caso base se eligió el sistema de Kundur de 2 áreas y 4 máquinas (Kundur, 2022). Este sistema consta de 4 generadores síncronos, 3 líneas de transmisión, 2 transformadores, 6 buses y 2 cargas, como se puede apreciar en el diagrama unifilar de la Figura 7.

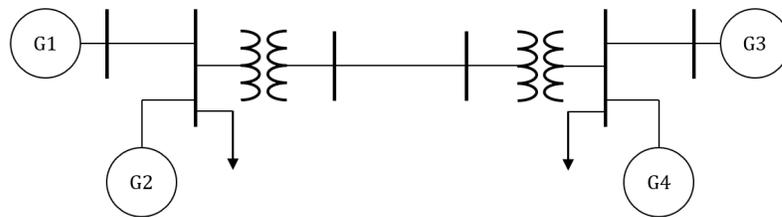


Figura 7. Diagrama unifilar del sistema base de 2 áreas y 4 máquinas.

Una vez que el sistema ha sido modelado en el software EMTP, el siguiente paso consiste en revisar que el modelo sea correcto y converjan sus flujos de potencia a los valores correctos. El sistema de caso base simulado en EMTP es representado en la Figura 8. Como se puede observar, se añadieron medidores de voltajes trifásicos en los buses de conexión de los generadores con la red.

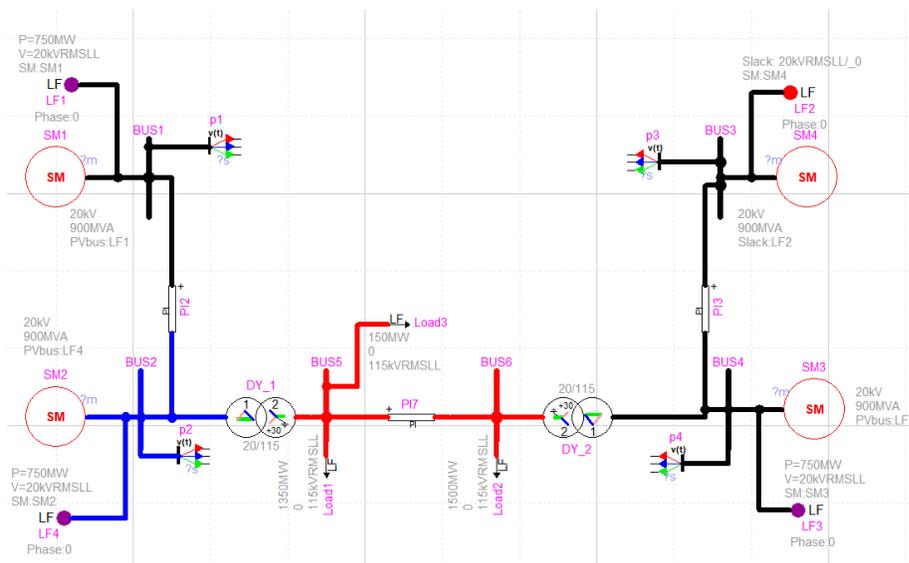


Figura 8. Representación del caso base en EMTP.

Sin embargo, no se contaban con los datos de sistemas de excitación y gobernadores necesarios para la correcta estimación de inercia, por lo que se tomaron los modelos más sencillos disponibles en EMTP y se procedió a usar datos típicos que proveyeran una respuesta estable y rápida ante disturbios. El sistema de prueba con excitadores y gobernadores es mostrado a continuación en la Figura 9.

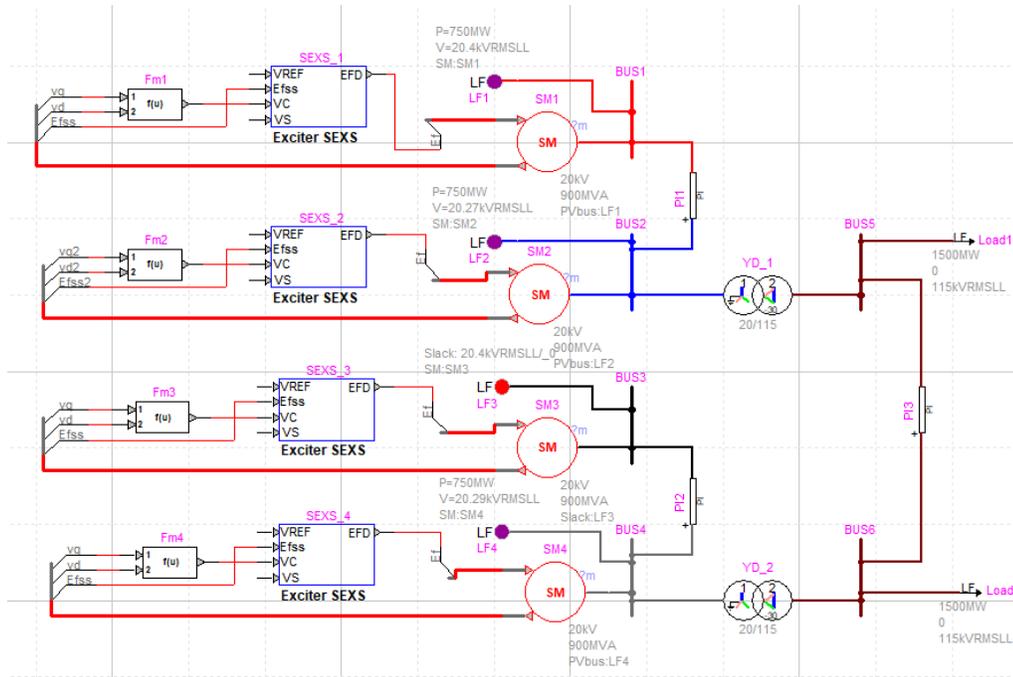


Figura 9. Representación en EMTP del caso base con excitadores y gobernadores.

## 6.2 Aplicación al caso base

Para proceder a la estimación de la inercia del caso base, primero se plantea el disturbio que se aplicará a los sistemas de prueba. Como se puede observar de las figuras 8 y 9, la potencia total conectada al sistema es de 3000 MW, repartido en dos cargas de 1500 MW en los buses 5 y 6, respectivamente. La carga del bus 6 consiste en dos cargas, una de 1350 MW y otra de 150 MW. Esta última representa el 5% de la carga total y será desconectada después de 1 segundo de iniciada la simulación.

El primer segundo de simulación que se mencionó anteriormente tiene el objetivo de permitir a los controles de los dispositivos iniciarse y llegar a un estado estable. Adicionalmente, la simulación se realizó hasta un tiempo de 30 segundos y con un paso de tiempo de 0.1 ms.

### 6.2.1 Estimación de la frecuencia del CDI

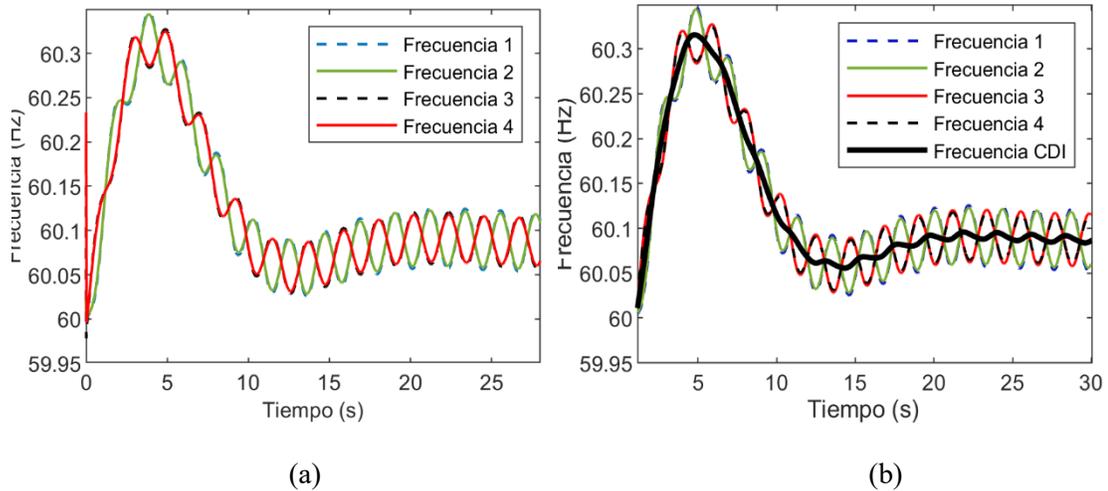
Una vez que la falla descrita anteriormente ha sido aplicada al sistema de prueba, se procede a obtener las mediciones de las señales de voltaje de los buses de conexión de los generadores síncronos. Posteriormente, la estrategia planteada en el Algoritmo 1 es utilizada para estimar las señales de frecuencia de cada generador y la señal de la frecuencia  $f_{CDI}$ . Los resultados de las frecuencias de cada generador son mostrados en la gráfica de la Figura 10, donde también se añade la frecuencia global  $f_{CDI}$ , resaltada con una línea negra más gruesa. De la Figura 10, se puede observar que las frecuencias de los generadores han sido estimadas de muy buena manera con la estrategia basada en los cruces por cero y que, de hecho, se pueden observar dinámicas de oscilación inter-área en estas señales. Por otra parte, en la frecuencia  $f_{CDI}$  se puede observar que efectivamente filtra las dinámicas locales de los generadores y provee una frecuencia global del sistema.

### 6.2.2 Estimación de la RoCoF y la inercia

Ahora bien, la gráfica de  $f_{CDI}$  mostrada en la Figura 10 puede ser utilizada para calcular la RoCoF por medio de la pendiente observada en los primeros instantes después del disturbio.

De esta manera, al utilizar la ecuación (15), se obtuvo

$$RoCoF = \frac{60.0999 - 59.9967}{0.849 - 0.016} = 0.1238 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \quad (17)$$



**Figura 10.** (a) Señales de frecuencia de los generadores síncronos. (b) Señales de frecuencia de los generadores incluyendo la frecuencia del centro de inercia. Caso base.

Por lo tanto, la RoCoF tiene un valor de 0.1238 Hz/s para el caso base. Como se puede notar, se tomaron dos puntos de la gráfica en 0.016 y 0.849 s. El primer valor se tomó así porque la frecuencia tiene un pico inicial debido a la aplicación del disturbio. El segundo tiempo de 0.849 s fue tomado así para poder tener una comparación fiable contra el caso del sistema de potencia con paneles fotovoltaicos, como se verá en la siguiente Sección.

Continuando ahora con la estimación de la inercia, se utilizará aquí la fórmula (16), donde es necesario conocer, además de la RoCoF, los parámetros  $f_0$ ,  $S$ , y  $\Delta P$ . Primeramente, se puede ver de la Figura 10 que la frecuencia  $f_0$  tiene un valor inicial de 60 Hz, la cual es la frecuencia de la red.

Después, recordando que  $S$  es la potencia nominal total de los generadores, esta se obtiene de los datos nominales de las máquinas dados en (Kundur, 2022), resultando en un total de 3600 MVA. Además, la potencia de la carga desconectada,  $\Delta P$ , como ya se mencionó anteriormente, tiene un valor de 150 MW. Finalmente, sustituyendo estos datos en la fórmula (16) obtenemos:

$$H_{\text{sis}} = \frac{1}{2(3600)} (60) \frac{1}{(0.1238)} (150) = 10.0969 \text{ s} \quad (18)$$

Este valor representa la inercia total del sistema de la Figura 9.

### 6.3 Sistema con generación fotovoltaica

Ahora, se procede a analizar el sistema de 2 áreas con penetración de energías renovables. La modificación que se hace respecto al caso base es que ahora se tiene un parque fotovoltaico de 75 MW conectado directamente al bus 6, como se puede apreciar en la Figura 11. Con el objetivo de

compensar la potencia que ahora es proporcionada por el parque fotovoltaico, la potencia entregada por el generador síncrono número 4 (conectado al bus 4) es reducida a 675 MW.

### 6.3.1 Estimación de la frecuencia del CDI

Ahora, se aplica la misma falla que se consideró para el caso base y se obtienen las mediciones de los voltajes trifásicos en el tiempo. Al aplicar el método propuesto a las mediciones obtenidas, se calcularon las frecuencias individuales de los generadores síncronos, las cuales son dibujadas en la Figura 12(a) de abajo. Como se puede notar, con la inclusión del parque fotovoltaico ahora se encuentran bastantes variaciones rápidas de la frecuencia que pueden hacer más complicada la estimación de la inercia.

Después, se utiliza nuevamente la ecuación (15) para estimar la frecuencia del centro de inercia del sistema con el parque fotovoltaico, resultando en la gráfica de la Figura 12(b). Como en el caso base, esta frecuencia  $f_{CDI}$  logra filtrar las dinámicas electromecánicas locales; sin embargo, algunas variaciones de frecuencia persisten, lo cual puede dificultar el cálculo de su pendiente en los primeros instantes después del disturbio.

### 6.3.2 Estimación de la RoCoF y la inercia

Una vez que la falla descrita anteriormente ha sido aplicada al sistema de prueba, se procede a obtener la RoCoF por medio de la fórmula (15), resultando en:

$$RoCoF = \frac{60.098174 - 59.991262}{0.8371 - 0.0161} = 0.1302 \frac{Hz}{s} \quad (19)$$

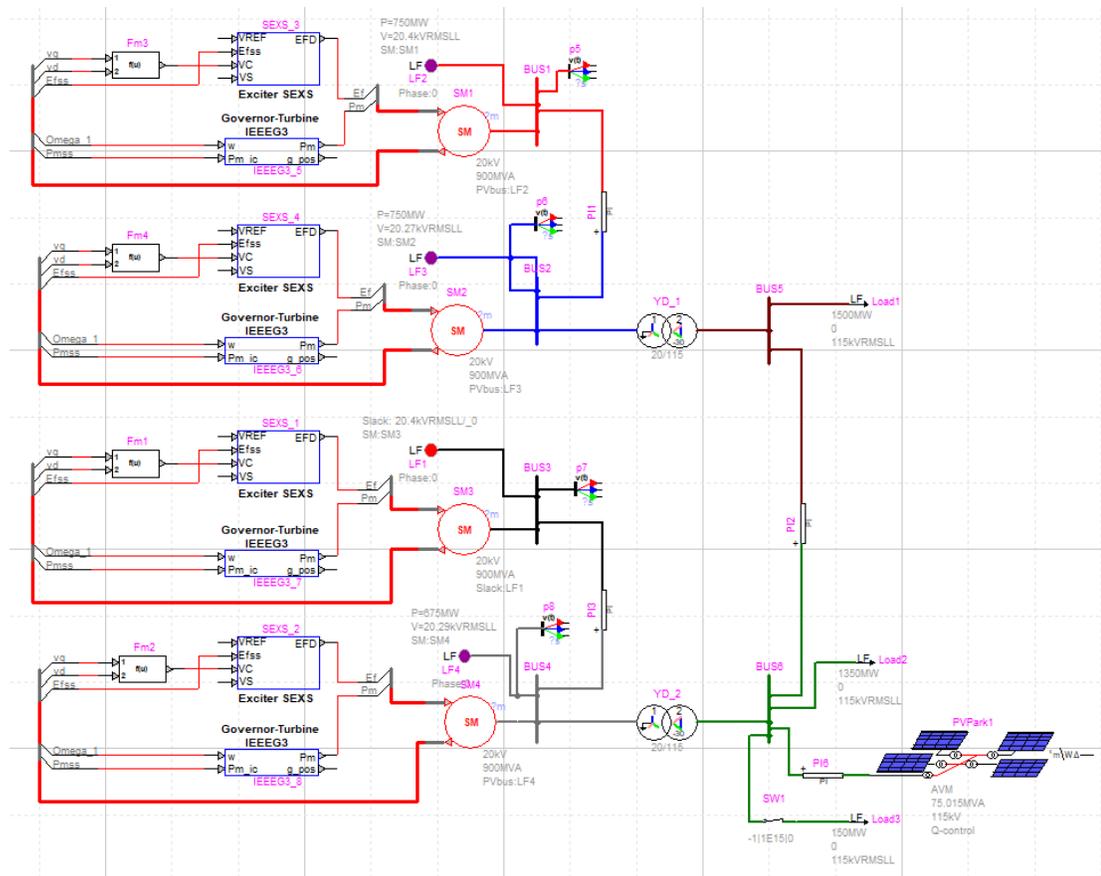
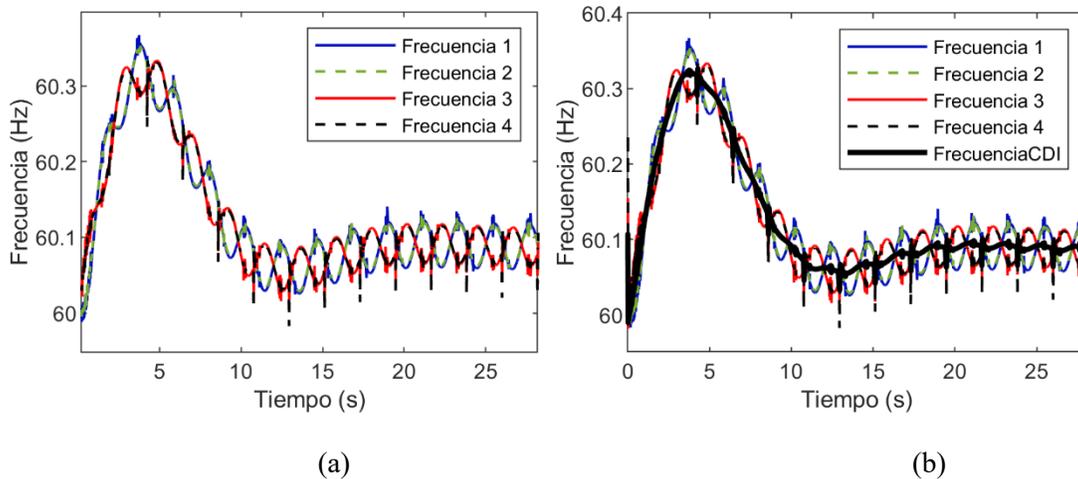


Figura 11. Sistema de prueba con un parque fotovoltaico de 75 MW conectado al bus 6.

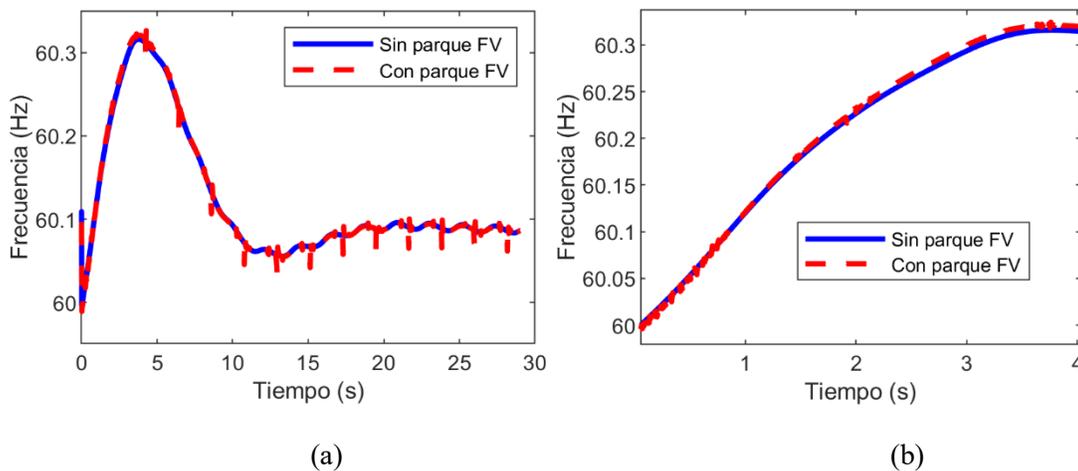


**Figura 12.** (a) Frecuencias de los generadores síncronos y (b) del centro de inercia. Sistema de prueba con un parque fotovoltaico de 75 MW conectado al bus 6.

Este valor de RoCoF, tal como se suponía, resulta ser ligeramente más alto que con el caso base, donde no existe energía renovable. La diferencia entre las dos frecuencias del centro de inercia, y la correspondientes derivadas de la frecuencia puede ser apreciado de mejor manera en la Figura 13.

De la Figura 13, se puede observar que los primeros instantes de la respuesta después del disturbio presentan alta variación o ruido en la estimación de frecuencia, la cual dificulta en gran manera la estimación de la RoCoF. Estas mismas variaciones se estabilizan después de aproximadamente 0.8 segundos, por lo cual se ha tomado el instante de tiempo alrededor de dicho valor para ambos casos, el caso base y el caso con fotovoltaicos.

Además de lo mencionado anteriormente, también se puede observar que, debido a la reducción en la inercia global, la respuesta inercial del sistema alcanza un valor cenit más alto, lo cual coincide con la reducción en la estabilidad de frecuencia que se teorizó anteriormente.



**Figura 13.** Comparación de las frecuencias globales del caso base y el sistema con generación fotovoltaica. (a) Toda la ventana de estudio. (b) Detalle sobre los primeros 4 segundos.

Ahora, continuando con la comparación, la inercia total del sistema para el caso con paneles fotovoltaicos, este cálculo resulta de la siguiente operación:

$$H_{sis} = \frac{1}{2(3600)} (60) \frac{1}{(0.1302)} (150) = 9.6 \quad (20)$$

Lo anterior representa una reducción del 5.117% con respecto a la inercia calculada para el caso base. Esto es consistente con la penetración del 5% de la energía renovables que fue considerada dentro de los presentes análisis.

## 7. Conclusiones

En este trabajo se estudió el efecto de la inclusión de parques fotovoltaicos sobre la inercia global de un sistema eléctrico de potencia. Este es un problema de gran relevancia, ya que la conexión de este tipo de energías renovables se está haciendo cada vez más común debido al avance de las tecnologías, la demanda cada vez más alta de energía en el mundo y la problemática ambiental que atravesamos gracias a la quema de combustibles fósiles.

Se propuso un método para la estimación de la inercia que consta de tres etapas: La estimación de la frecuencia a partir de señales de voltaje trifásicas, la estimación de la pendiente de la frecuencia obtenida en los primeros instantes después de una perturbación, y la estimación de la inercia global del sistema. Esta metodología se implementó sobre mediciones realizadas sobre una simulación en EMTP.

La propuesta realizada se aplicó sobre el sistema de 2 áreas y 4 máquinas, primero con solo generadores síncronos y después con una penetración del 5% de energía fotovoltaica, y se aplicó una pérdida de carga del 5%.

Las señales de frecuencias fueron obtenidas de forma adecuada para ambos sistemas, aunque se observaron variaciones para el caso con paneles fotovoltaicos. Dichas variaciones complicaron el cálculo de la RoCoF para el caso con energías renovables, pero se logró obtener un punto de referencia adecuado. Las estimaciones de inercia resultaron en una reducción del 5.117% en la inercia del sistema, lo cual es un resultado congruente. Sin embargo, se observó la necesidad de implementar estrategias de filtrado que ayuden a mejorar las estimaciones y lograr un método más robusto y automático.

La aplicación de este método a sistemas más grandes y con diversos niveles de penetración es un tema de investigación que se está desarrollando y que puede ayudar al monitoreo y control de sistemas de potencia en tiempo real.

## Referencias

- Best, R. J., Brogan, P. V., Morrow, D. J. (2021) power system inertia estimation using hvdc power perturbations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(3), 1890-1899. 10.1109/TPWRS.2020.3028614
- Cai, G., Yang, B., Yang, D., Sun, Z., & Wang, L. (2019). Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6), 4291-4299. 10.1109/TPWRS.2019.2914356
- Carrasco, F., & Rahmann, C. (2016). Effects of inertial response and ramp reserve requirements in the unit commitment. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM) (pp. 1-5).. 10.1109/PESGM.2016.7741925
- EMTP Manual. (2020).
- Gotti, D., Bizzarri, F., Brambilla, A., del Giudice, D., Grillo, S., Linaro, D., Ledesma, P., & Amaris, H. (2024). Inertia estimation of a power system area based on iterative equation error system

- identification. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(5), 6469-6481. 10.1109/TPWRS.2024.3353077
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill.
- Hartmann, B., Vokony, I., & Táci, I. (2019). Effects of decreasing synchronous inertia on power system dynamics—Overview of recent experiences and marketisation of services. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(12), e12128. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12128>
- Jiang, J. A., Liu, C. W., & Chen, C. S. (2002). A novel adaptive PMU-based transmission-line relay-design and EMTP simulation results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(4), 930-937. 10.1109/MPER.2002.4312421
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables\\_2023.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf)
- Inoue, T., Taniguchi, H., Ikeguchi, Y., & Yoshida, K. (1997). Estimation of power system inertia constant and capacity of spinning-reserve support generators using measured frequency transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1), 136-143.
- Karaagac, U., Ashourian, H., Kocar, I., Stepanov, S., Gras, H., & Mashedian, J. (2021). *PV Parks Models in EMTP*. EMTPWorks.
- Kundur, P. S., & Malik, O. P. (2022). *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education.
- Li, H., You, S., Jiang, Z., Tan, J., Hoke, A., & Liu, J. (2024). Ambient-frequency-data based system-level inertia estimation using physical equation and its practice on hawaii islands. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(6), 6948-6959. 10.1109/TPWRS.2024.3382672
- Linaro, D., Bizzarri, F., del Giudice, D., Pisani, C., Giannuzzi, G. M., Grillo, S., Brambilla, A. M. (2023) Continuous estimation of power system inertia using convolutional neural networks. *Nature communications* 14, 4440. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40192-2>
- Makolo, P., Zamora, R., & Lie, T.-T. (2021) Online inertia estimation for power systems with high penetration of RES using recursive parameters estimation. *IET Renewable Power Generation*, 15(12), 2571-2585. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12181>
- Mazidi, M., McKelvey, T., & Chen, P. (2023). A pure data-driven method for online inertia estimation in power systems using local rational model approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(5), 5506-5516. 10.1109/TIA.2023.3288503
- Milano, F. and Ortega, A. (2017). Frequency divider. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 1493-1501.
- Molina-Pineda, S. U., Román-Messina, A., Hernández-Ortega, M. A., Golpîra, H. (2023). A center-of-gravity-based framework for small- and large-signal frequency analysis of interconnected power systems. *Electric Power Systems Research*, 223. 10.1016/j.epsr.2023.109677
- Porretta, B. (2020) Inertial Response of Electrical Power Systems, 2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC) (1-6). 10.1109/EPEC48502.2020.9320019.
- Poudyal, A., Tamrakar, U., Trevizan R. D., Fourney, R., Tonkoski, R., Hansen, T. M. (2022). Multiarea inertia estimation using convolutional neural networks and federated learning. *IEEE Systems Journal*, 16(4), 6401-6412. 10.1109/JSYST.2021.3134599
- Rogers, G. (2000). *Power system oscillations*. Springer Science & Business Media.
- Secretaría de Energía. (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2023 - 2037). <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- Secretaría de Energía. (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2024 - 2038). <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038>

- Tan, B., Zhao, J., Netto, M., Krishnan, V., Terzija, V., & Zhang, Y. (2022). Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 134, 107362.
- Tan, B., Zhao, J., Netto, M., Krishnan, V., Terzija, V., Zhang, Y. (2022) Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107362>
- Tan, B. & Zhao, J. (2024). Data-driven adaptive unscented kalman filter for time-varying inertia and damping estimation of utility-scale IBRs considering current limiter. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(6), 7331-7345. 10.1109/TPWRS.2024.3379956
- Tuo, M & Li, X. (2023). Machine Learning Assisted Inertia Estimation Using Ambient Measurements. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(4), 4893-4903. 10.1109/TIA.2023.3269732
- Wang, B., Sun, H., Li, W., Yang, C., Wei, W., Zhao, B., & Xu, S. (2021). Power system inertia estimation method based on maximum frequency deviation. *IET Renewable Power Generation*, 16(3), 622-633. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12367>
- Wang, B., Yang, D., Cai, G., Chen, Z., & Ma, J. (2022). An improved electromechanical oscillation-based inertia estimation method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(3), 2479-2482. 10.1109/TPWRS.2022.3156441
- Wang, Y., Yokoyama, A., Baba, J. (2024) A multifunctional online estimation method for synchronous inertia of power systems using short-time phasor transient measurement data with linear least square method after disturbance. *IEEE Access*. 10.1109/ACCESS.2024.3358902
- Zografos, D., Ghandhari, M., & Eriksson, R. (2018). Power system inertia estimation: Utilization of frequency and voltage response after a disturbance. *Electric Power Systems Research*, 161, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2018.04.008>

# Dispositivo IoT para la Agricultura de Precisión en un Cultivo de Maíz

## IoT device to Precision Agriculture in a Corn Crop

Emmanuel Ballesteros<sup>a</sup>, Lina M. Aguilar-Lobo<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> *Maestría en Ciencias Computacionales, Universidad Autónoma de Guadalajara, Av. Patria 1201, Zapopan CP 45129, Jalisco, Mexico, emmanuel.ballesteros@edu.uag.mx*

<sup>b</sup> *Departamento de Computación e Industrial, Universidad Autónoma de Guadalajara, Av. Patria 1201, Zapopan CP 45129, Jalisco, Mexico, lina.aguilar@edu.uag.mx*

\* autor por correspondencia

### RESUMEN

Tradicionalmente los agricultores se han basado en su intuición y experiencia para llevar a cabo las distintas tareas del campo siguiendo un calendario predefinido dado por la experiencia, por lo que la gran mayoría de los agricultores aplican agua y nutrientes sin tener una medida real de la cantidad necesaria requerida para las necesidades del cultivo. Actualmente, tecnologías relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT) permiten implementaciones para que este tipo de tareas en la agricultura sean más eficientes y generen un mayor rendimiento. Mediante la implementación de redes inalámbricas de sensores que permiten medir en tiempo real las condiciones del suelo se pueden tomar decisiones y ejercer las acciones más convenientes de acuerdo a las necesidades del cultivo. Esta técnica es llamada agricultura de precisión, la cual se define como un conjunto de tecnologías para optimizar la producción agrícola a través del manejo de condiciones propias del cultivo y con la cual se logra una aplicación más precisa de insumos como pesticidas, herbicidas y fertilizantes, ayudando a reducir costos y obtener mayores rendimientos, al mismo tiempo que se logra una operación respetuosa con el medio ambiente. En este trabajo se presenta el diseño y validación de un dispositivo IoT de bajo costo, para el monitoreo y control de un cultivo de maíz como parte de una gestión basada en la agricultura de precisión. El dispositivo ha sido diseñado para medir tanto las variables de temperatura y humedad relativa del ambiente, como la humedad y el pH del suelo. La validación se realizó en un cultivo de maíz del Estado de Jalisco, México, y los resultados demuestran un mayor rendimiento de la cosecha.

**Palabras clave:** Internet de las cosas, Agricultura de precisión, dispositivo IoT.

### ABSTRACT

Traditionally, farmers have relied on their intuition and experience to carry out different field tasks following a predefined schedule given by experience, which is why most farmers apply water and nutrients without having an accurate measure of the quantity necessary for the needs of the crop. Currently, technologies related to the Internet of Things (IoT) allow implementations so that these types of tasks in agriculture are more efficient and generate excellent performance. By implementing wireless sensor networks that allow soil conditions to collect data in real-time, it is possible to make the correct decisions according to the needs of the crop. This technique is called precision agriculture. There is a set of technologies to optimize agricultural production by managing crop conditions, with a more precise application of inputs such as pesticides, herbicides, and fertilizers helping to reduce costs and obtain higher yields while achieving an environmentally friendly operation. This work presents the design and validation of a low-cost IoT device for monitoring and controlling a corn



materia orgánica y con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular (Strategies For Successful Corn Planting, s. f.)

En este trabajo se presenta el desarrollo de un dispositivo IoT para la implementación de la agricultura de precisión, de bajo costo, que permite monitorear un cultivo de maíz a través de la medición de variables como la humedad y la temperatura del ambiente, y, la humedad y el pH del suelo del cultivo. El dispositivo diseñado ha sido validado en un entorno real en un cultivo de maíz ubicado en el estado de Jalisco, México

## 2. Trabajos relacionados

En la literatura se pueden encontrar diversas publicaciones relacionadas con la agricultura de precisión y el uso del IoT en la agricultura, entre otros (Peladarinos et al., 2023).

En (Placidi et al., 2021) se diseñó una red de sensores inalámbricos de baja potencia basada en el protocolo LoRaWAN para una aplicación de agricultura de precisión de bajo costo para monitorear invernaderos. Las variables medidas son la humedad y temperatura del suelo, humedad relativa y temperatura del ambiente. En el diseño se emplearon componentes comerciales y software gratuito o de código abierto y la validación experimental se realizó en un ambiente de laboratorio.

El trabajo presentado en (Kour et al., 2022) presenta un análisis para seleccionar sensores para adecuados para implementaciones IoT en un cultivo hidropónico de azafrán. Los modelos seleccionados se evalúan mediante un simulador para obtener las métricas de desempeño de cada sensor para dicho cultivo.

Una metodología para implementar una arquitectura de red de sensores inalámbricos escalable para el monitoreo y control en un cultivo remoto con el objetivo de lograr una adecuada gestión de recursos hídricos y obtener una mejor productividad es presentado en (Sanjeevi et al., 2020). El trabajo fue validado en un entorno de laboratorio.

Una plataforma IoT personalizable, escalable y confiable fue diseñada para los pequeños agricultores de Nepal en (Lamsal et al., 2023) En esta plataforma se puede visualizar, monitorear y controlar datos en tiempo real sobre los cultivos, el ganado y otros activos agrícolas. La validación se realizó mediante una compativa Blynk IoT y ThingSpeak IoT, logrando un buen rendimiento en tiempo de respuestas, capacidad de almacenamiento y procesamiento.

Una aplicación de IoT para Android, basada en la nube para la agricultura de precisión es presentada en (Dholu & Ghodinde, 2018), la cual incluye también el desarrollo de un nodo sensor para medir la humedad del suelo, la temperatura y la humedad relativa y enviar los datos a la nube para procesarlos, almacenarlos y tomar decisiones para accionar de forma automática la válvula para el riego por goteo.

## 3. Materiales y Métodos

### 3.1 Diseño del Dispositivo IoT

El diagrama presentado en la Figura 2 muestra el sistema IoT propuesto para implementar la agricultura de precisión en un cultivo de maíz. Los componentes de este sistema son:

- Una red inalámbrica de sensores de largo alcance y baja potencia distribuida por todo el cultivo. En este caso se propone el uso de la tecnología LoRa.
- Un servidor en la nube para almacenar y procesar la información recolectada por los sensores.
- Un tablero de visualización y control del sistema.

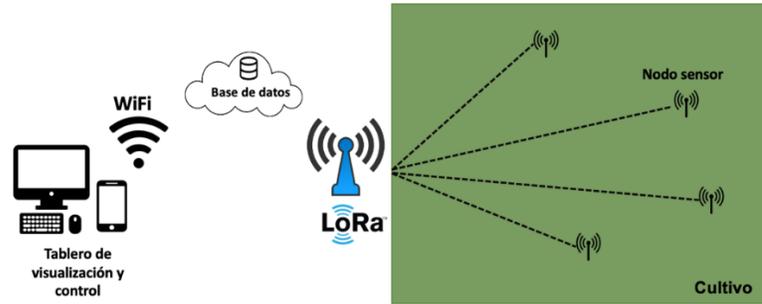


Figura 2. Diagrama general de un sistema IoT para la agricultura de precisión.

El principal componente del sistema propuesto es el nodo sensor, cuyo nombre genérico en la literatura es dispositivo IoT. Para el sistema de agricultura de precisión propuesto en la Figura 2, el dispositivo IoT es el encargado de medir las variables físicas del suelo del cultivo, enviarlos al servidor en la nube para que sean almacenados, y posteriormente procesarlos para tomar las decisiones relacionadas con el proceso de riego del cultivo.

El presente trabajo se centra en el desarrollo del dispositivo IoT para monitorear un cultivo de maíz, como parte de un sistema IoT para la agricultura de precisión. En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques del dispositivo IoT diseñado.

El dispositivo está compuesto por:

- Un microcontrolador Arduino UNO R3,
- Un sensor de temperatura y humedad,
- Un sensor de pH,
- Un sensor de humedad del suelo y,
- Una batería.

El sensor de pH ha sido agregado debido a que esta variable representa un indicador muy importante y un factor para decidir que nutrientes necesita la planta para que se desarrolle correctamente. El pH influye fuertemente en la forma en que se absorben, desde la raíz, los nutrientes de una planta. Si el pH es demasiado alto o demasiado bajo, los nutrientes no se asimilan de forma óptima. Un valor ideal de pH se encuentra entre 5 y 6.

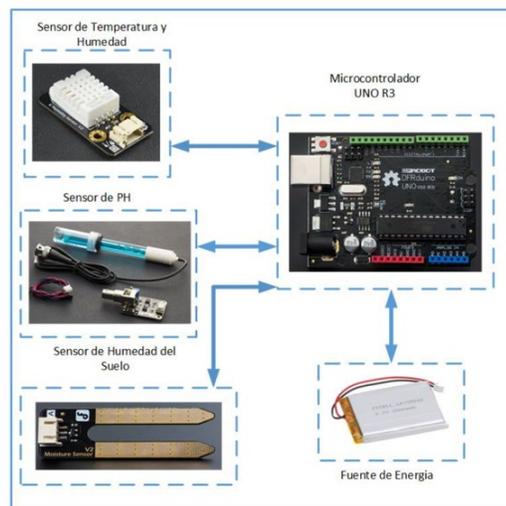


Figura 3. Diagrama de bloques del dispositivo IoT desarrollado.

### 3.2 Componentes del Dispositivo IoT

Las características particulares de cada uno de los componentes empleados para el dispositivo IoT son las siguientes:

- Microcontrolador Arduino (*Arduino - Home*, s. f.). Con buenas características generales, suficiente capacidad de procesamiento y bajo costo, hacen que sea una tarjeta adecuada para prototipado. Es una plataforma de código abierto basado en hardware y software flexibles, con un microcontrolador ATMEGA328 y dispone de 14 puertos de entrada/salida de propósito general, 6 entradas analógicas, 1 puerto UART. La imagen del Arduino UNO R3 es presentada en la Figura 4.

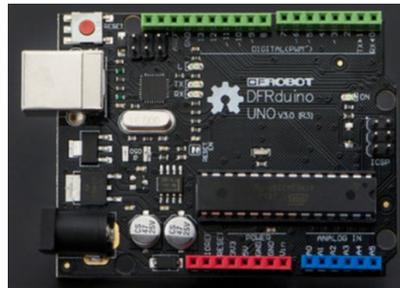


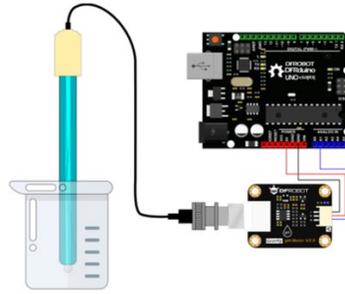
Figura 4. Microcontrolador Arduino UNO.

- Sensor de Humedad y Temperatura ambiental DHT22 ([alldatasheet.com](http://alldatasheet.com), s. f.). Es un sensor digital que utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, generando el valor medido como una señal digital en el pin de datos. Es bastante simple de usar, pero requiere una sincronización para la recolección de datos. El único requerimiento de este sensor es que solo puede obtener nuevos datos una vez cada 2 segundos, sin embargo, para aplicaciones donde el tiempo no es crítico, como aplicaciones de agricultura de precisión, esta condición es suficiente. Tiene un rango de medición entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $80^{\circ}\text{C}$ , una resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . El sensor DHT22 es presentado en la Figura 5.



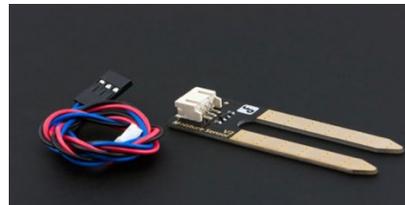
Figura 5. Sensor de temperatura y humedad DHT22

- Sensor de PH DFRobot Gravity ([dfrobot.com](http://dfrobot.com), s. f.). Es un medidor de PH analógico diseñado para medir una solución y reflejar su alcalinidad. Se usa comúnmente en diversas aplicaciones como la acuaponía, la acuicultura y las pruebas ambientales de agua. El modelo usado es el V2 el cual es una versión mejorada del V1 que obtiene una mejor precisión y es de uso fácil. El sensor trae integrado un regulador de voltaje y puede ser usado sin requerir soldadura, lo que lo hace adecuado para prototipos. El sensor de pH y diagrama de conexión es presentado en la Figura 6.



**Figura 6.** Diagrama de conexión del sensor de pH.

- Sensor de humedad de suelo SKU SEN0114 (dfrobot.com, s. f.-b). Permite leer la cantidad de humedad presente en el suelo. Es un sensor ideal para mediciones en cultivos o jardines. Cuenta con dos sondas para pasar corriente eléctrica a través del suelo circundante, y luego lee la resistencia para obtener el nivel de humedad. Es un sensor de salida analógica y es presentado en la Figura 7.



**Figura 7.** Sensor de humedad del suelo

- Batería. La alimentación requerida para el dispositivo usada para el prototipo es una batería de litio de una sola celda capaz de entregar 3.7 voltios de corriente directa, una corriente de 1200 mA y una descarga sostenida de 2 veces la corriente nominal. Además incluye un circuito impreso con protección contra descargas y sobrecargas para asegurar la vida útil y evitar riesgo de incendio. La batería es presentada en la Figura 8.



**Figura 8.** Batería de iones de litio.

#### 4. Resultados y discusión

Una vez desarrollado y construido el dispositivo IoT para la agricultura de precisión, este fue instalado en el suelo de un cultivo de maíz del Estado de Jalisco, México, y se recolectaron datos durante un período de tres meses. Estos datos fueron transmitidos al servidor para ser almacenados y procesados.

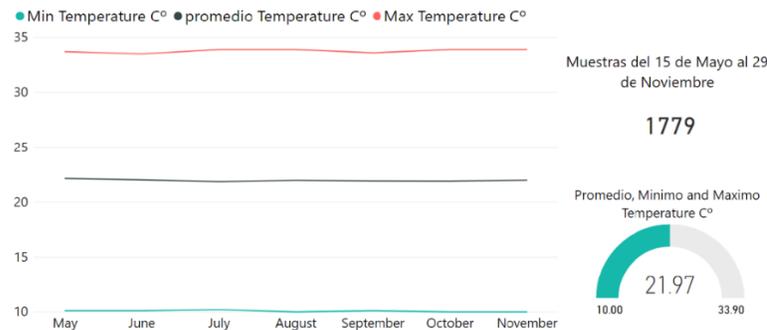
En la Figura 9 se muestra el prototipo del dispositivo IoT instalado en el cultivo de maíz. Se puede observar que el prototipo comprende una carcasa de protección para los componentes electrónicos que ha sido fabricada en acrílico para que resista las condiciones ambientales y no se dañen los componentes. Los sensores de pH y humedad del suelo se encuentran fuera de la carcasa para realizar las mediciones de estas variables en el suelo del cultivo.



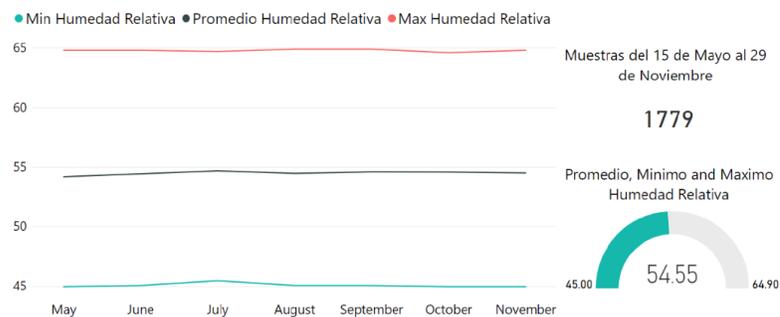
**Figura 9.** Nodo sensor implementado en un cultivo de maíz.

El procesamiento de los datos fue realizado empleando la herramienta Power BI Report Server, en la cual se puede visualizar el valor medido para cada variable con respecto a la fecha y hora de la medición realizada por el dispositivo IoT.

Para la variable de temperatura los datos medidos se presentan en la Figura 10. Se puede observar el comportamiento a través del tiempo para esta variable, y se calcula el valor promedio, y se obtienen los valores mínimo y máximo. De la misma forma, en la Figura 11 se observan los datos obtenidos para la variable Humedad Relativa.



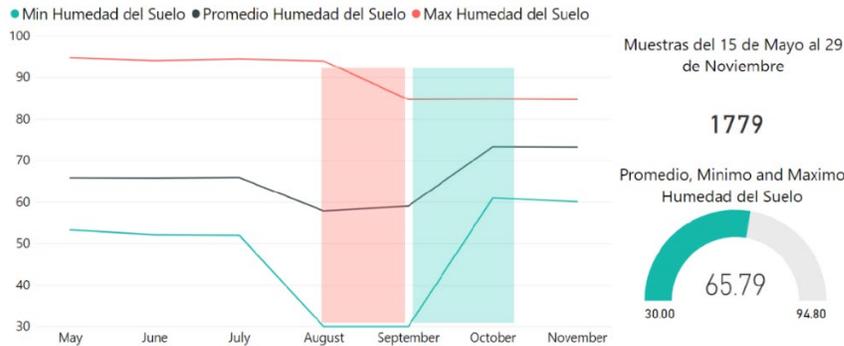
a)



b)

**Figura 10.** Datos medidos por el sensor de temperatura y humedad relativa del dispositivo IoT.

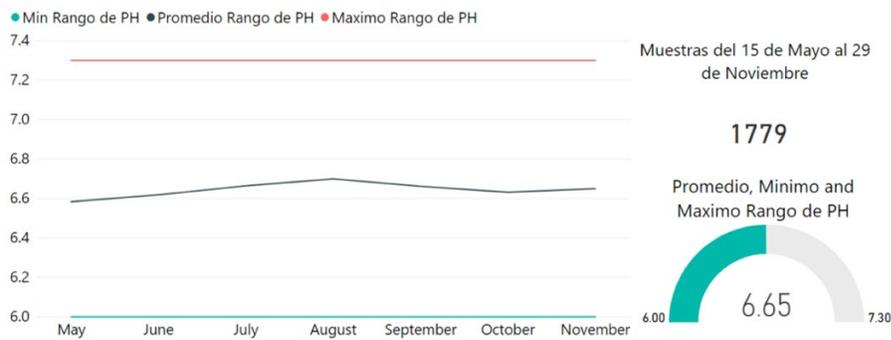
Para la variable humedad del suelo, los resultados se presentan en la Figura 11. Se puede observar que esta variable sufre un cambio significativo en los meses de agosto y septiembre. En la parte sombreada en color rojo de la Figura 11 se observa un decremento considerable en la humedad del suelo, lo cual alertó al agricultor sobre la disminución del agua en el cultivo. Las mediciones obtenidas en la parte sombreada en color verde de la misma Figura 11, muestran el aumento de la humedad del suelo después de la acción implementada por el agricultor, la cual fue agregar suficiente agua por medio de un pozo artesanal para mitigar la escasez de lluvia durante este período de tiempo.



b)

**Figura 11.** Datos medidos por el sensor de humedad del suelo del dispositivo IoT.

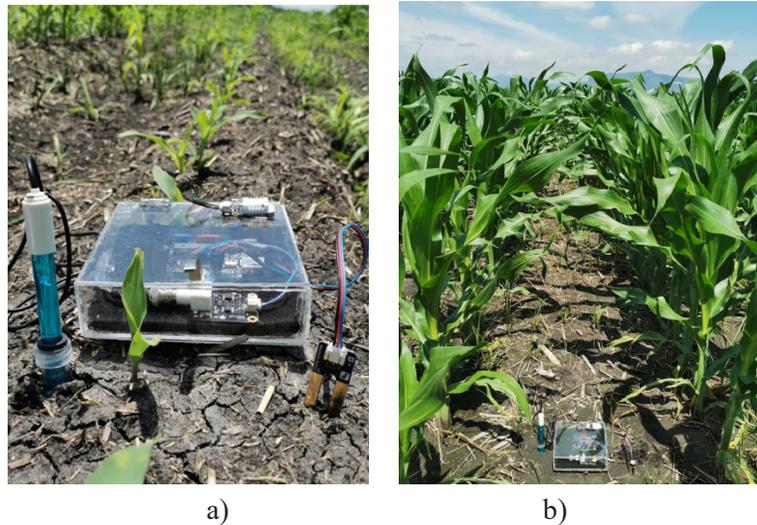
De acuerdo con la ubicación del terreno del cultivo, este tiende a ser ácido en lugar de alcalino, lo cual favorece de manera positiva ya que la mayoría de los nutrientes pueden ser absorbidos al 100% por la planta, principalmente en suelos que tienen un pH entre 6 y 7. Esto se puede observar en la Figura 12 donde se muestra el comportamiento de la variable pH, donde se muestra que esta variable no sufre un cambio significativo durante el tiempo de vida del cultivo.



b)

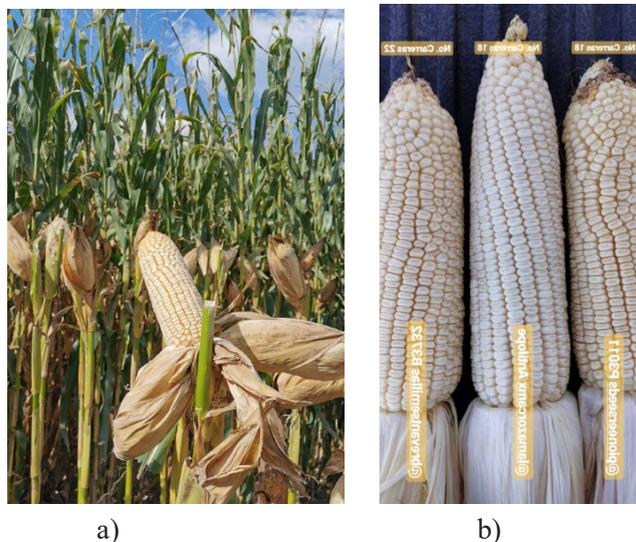
**Figura 12.** Datos medidos por el sensor de pH del dispositivo IoT.

Se realizaron diversas pruebas de campo en el cultivo de maíz, durante varias etapas del desarrollo del cultivo. Por ejemplo, en la Figura 13a se observa el dispositivo IoT en campo durante las primeras etapas del cultivo, donde es de suma importancia conocer los valores de pH, temperatura y humedad del suelo. En la Figura 13b se observa la planta en etapa 2, mostrando un crecimiento óptimo debido que todos los nutrientes se aplicaron de acuerdo a las necesidades



**Figura 13.** Pruebas de campo del prototipo del dispositivo IoT. A) Mediciones en las primeras etapas del cultivo. B) Mediciones en las últimas etapas del cultivo.

Posteriormente, en las últimas etapas del cultivo, tal como se muestra en la Figura 13, se puede observar la planta mucho mas grande. En estas etapas finales es donde son visibles los estigmas del maíz, comúnmente llamado espigas, comienzan los primeros elotes y el grano se empieza a llenar de un líquido blanco, como se muestra en la Figura 14a. En esta etapa es de vital importancia que el cultivo tenga una humedad del suelo por arriba del 50%, ya que el llenado del elote y el grano requieren en su mayoría agua. La Figura 14b muestra la planta de maíz en demostración en verde, lo cual consiste en abrir una mazorca y pelarla para contar el número de carreras o líneas de granos que tiene y validar que el llenado fue correcto.



**Figura 14.** a) Formación del elote. b) Demostración en verde en la planta de maíz.

En la etapa de cosecha, la planta se encuentra lista para ser sometida al proceso de trilla, el cual consiste en usar una trilladora para recolectar y desgranar las mazorcas, y almaenar los granos en un compartimento llamado tolba para posteriormente ser transportado a una báscula, silo o almacén para su debido uso ya sea alimenticio o de forraje. En la Figura 14b se compara la mazorca del cultivo intervenido con el dispositivo IoT con otras mazorcas que corresponden a cultivos no intervenidos. Se puede observar que el tamaño, largor y grosor de la mazorca del cultivo que fue monitoreado por medio del dispositivo IoT (central de la Figura 16) es mayor que el de las mazorcas que no fueron

atendidas por ningún dispositivo tecnológico (laterales de la Figura 16). En lo cultivos no intervenidos, los procesos de riego de forma tradicional, en intervalos de tiempo preestablecidos de acuerdo a la experiencia o intuición del agricultor, sin tener conocimiento alguno sobre la humedad, temperatura y pH del cultivo. Esta actividad de forma tradicional representa un gasto innecesario de agua en caso de que el suelo del cultivo tenga la humedad suficiente requerida, al mismo tiempo que no asegura una mayor cosecha.

Durante la cosecha, la cantidad de semilla recolectada fue colocada en una báscula. El proceso consistió en tomar 6 surcos de ida y 6 de venida, para el cultivo que fue monitoreado con el dispositivo IoT y para el cultivo que no fue intervenido. Se realizaron mediciones para obtener la longitud de los surcos y se pesó el maíz recolectado. Finalmente se calcularon todos los datos importantes durante la cosecha, los cuales son presentados en la Figura 15. Entre los parámetros mas importantes están el rendimiento por kilo y el rendimiento por hectárea puede observar que el cultivo intervenido por el dispositivo IoT (Antilope) obtuvo un mayor rendimiento que el cultivo no intervenido.

La validación del dispositivo en un cultivo del estado de Jalisco y los resultados evaluados durante la cosecha demuestran un rendimiento mayor comparado con un área de cultivo no intervenida. Aunque la diferencia no parezca tan significativa, demuestra que se obtiene un mayor rendimiento considerando que, en caso de que el dispositivo sea usado en la totalidad del área del cultivo, este rendimiento será mucho mayor. Adicionalmente, el hecho de conocer el estado real del suelo del cultivo, permite aplicar el riego solo cuando el suelo lo requiera, logrando un ahorro significativo de agua, principalmente en grandes cultivos de grandes áreas.

|          | No. de surcos | Longitud de surcos | Área de cultivo | Peso de semilla/kg | Peso de cosecha/kg | Rendimiento (Kg/ha) | Rendimiento (Kg/ha) | Costo por ha | Costo por kg |
|----------|---------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|
| B3732    | 12            | 196                | .75             | 1361               | 2335               | 15                  | 13236               | 13,082.83.00 |              |
| Antilope | 12            | 194                | .75             | 1746               | 2480               | 15.2                | 79,203.14.00        | 1105.000     |              |

Figura 15. Comparativa de resultados obtenidos con dos cultivos, el intervenido por el dispositivo IoT (Antilope) y el no intervenido (B3732).

## 5. Conclusiones

Con el presente trabajo se logró el desarrollo de un dispositivo IoT de bajo costo y fácil implementación que permite monitorear variables físicas como temperatura y humedad relativa del ambiente, pH y humedad del suelo para un cultivo de maíz en el estado de Jalisco, México. Con base en los datos recolectados, se implementó correctamente el riego controlado del cultivo para mantener los niveles óptimos en estas variables. La validación del dispositivo fue realizada en un área de cultivo específica y los resultados fueron comparados con un área en la que no se instaló el dispositivo IoT.

Los resultados demuestran que el rendimiento por Kg de maíz obtenido es mayor en el área intervenida. Esta implementación demostró que la implementación de un dispositivo IoT es una herramienta funcional y versátil para controlar el crecimiento óptimo de un cultivo. Los resultados obtenidos después de la cosecha, demuestran que la implementación de la tecnología en el sector agrícola es muy positiva ya que permite aumentar considerablemente la producción y calidad de la cosecha, al mismo tiempo que ayuda a disminuir los gastos de operación, y el ahorro de nutrientes. Este aumento se ve reflejado en ganancia económica para el agricultor y motiva al uso constante de este tipo de tecnología. Un mayor rendimiento de la cosecha y mayor ahorro de agua puede ser

obtenido al implementar mas dispositivos IoT a lo largo de toda la superficie del cultivo.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés

### Referencias

- alldatasheet.com. (s. f.). DHT22 Datasheet, PDF. Alldatasheet. [https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Dht22&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwo8S3BhDeARIsAFRmkOO6y1ZGHAQuq3gsvWAXgj3-TtWUpcM0o6OuPgY2jVMnWjf5ZgtznooaAtnrEALw\\_wcB](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Dht22&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwo8S3BhDeARIsAFRmkOO6y1ZGHAQuq3gsvWAXgj3-TtWUpcM0o6OuPgY2jVMnWjf5ZgtznooaAtnrEALw_wcB)
- Arduino - home. (s. f.). <https://www.arduino.cc/>
- Auernhammer, H. (2001). Precision farming — the environmental challenge. *Computers And Electronics In Agriculture*, 30(1-3), 31-43. [https://doi.org/10.1016/s0168-1699\(00\)00153-8](https://doi.org/10.1016/s0168-1699(00)00153-8)
- Chataut, R., Phoummalayvane, A., & Akl, R. (2023). Unleashing the Power of IoT: A Comprehensive Review of IoT Applications and Future Prospects in Healthcare, Agriculture, Smart Homes, Smart Cities, and Industry 4.0. *Sensors*, 23(16), 7194. <https://doi.org/10.3390/s23167194>
- dfrobot.com. (s. f.). Gravity: Analog pH Sensor/Meter Kit V2 (Arduino & Raspberry Pi & micro:bit Compatible). <https://www.dfrobot.com/product-1782.html>
- dfrobot.com. (s. f.-b). Gravity: Analog Soil Moisture Sensor for Arduino. <https://www.dfrobot.com/product-599.html>
- Dholu, M., & Ghodinde, K. (2018). Internet of Things (IoT) for Precision Agriculture Application. 2018 2nd International Conference On Trends In Electronics And Informatics (ICOEI). <https://doi.org/10.1109/icoei.2018.8553720>
- Khan R., S. U. Khan, R. Zaheer and S. Khan, "Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges," 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, 257-260.10.1109/FIT.2012.53.
- Kour, K., Gupta, D., Gupta, K., Anand, D., Elkamchouchi, D. H., Pérez-Oleaga, C. M., Ibrahim, M., & Goyal, N. (2022). Monitoring Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Approach to Sensor Selection and Hydroponic Saffron Cultivation. *Sensors*, 22(22), 8905. <https://doi.org/10.3390/s22228905>
- Lamsal, R. R., Karthikeyan, P., Otero, P., & Ariza, A. (2023). Design and implementation of internet of things (IoT) platform targeted for smallholder farmers: from Nepal perspective. *Agriculture*, 13(10), 1900.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023, 21 abril). Encuesta Nacional Agropecuaria 2019.. <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/607/study-description>
- Negrete, J. C. (2018). Internet of things in Mexican agriculture; a technology to increase agricultural productivity and reduce rural poverty. *Research and Analysis Journal*, 1(02), 40-52. <https://www.rajournals.com/index.php/raj/article/view/8>
- Peladarinos, N., Piromalis, D., Cheimaras, V., Tserepas, E., Munteanu, R. A., & Papageorgas, P. (2023). Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. *Sensors*, 23(16), 7128. <https://doi.org/10.3390/s23167128>
- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology*, 8, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2013.11.010>
- Placidi, P., Morbidelli, R., Fortunati, D., Papini, N., Gobbi, F., & Scorzoni, A. (2021). Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors*, 21(15), 5110.

<https://doi.org/10.3390/s21155110>

- Sanjeevi, P., Prasanna, S., Kumar, B. S., Gunasekaran, G., Alagiri, I., & Anand, R. V. (2020). Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. *Transactions On Emerging Telecommunications Technologies*, 31(12). <https://doi.org/10.1002/ett.3978>
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2017). Internet of Things: A Comprehensive Review of Enabling Technologies, Architecture, and Challenges. *IETE Technical Review*, 35(2), 205-220. <http://dx.doi.org/10.1080/02564602.2016.1276416>
- Coulter, J. (2021). Strategies for successful corn planting.. UMN Extension. <https://extension.umn.edu/corn-planting/strategies-successful-corn-planting>