



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ARREGLOS DE BARRAS PARA  
SUBESTACIONES DE CENTRALES  
EÓLICAS Y FOTOVOLTAICAS**

**TESINA**

Que para obtener el título de  
**Especialista en Energía Eléctrica**

**P R E S E N T A**

Edgar Abraham Flores Camacho

**DIRECTOR DE TESINA**

M.I. Jorge Quintana Castañeda



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

---

---

A Dios, por darme la fuerza para continuar a pesar de las adversidades.

A mis padres, **Julio Enrique Flores Roa** y **Guadalupe Camacho Arias**, por brindarme su apoyo en cada momento y nunca dejarme vencer.

A mis hermanos, **Mauricio Iván Flores Camacho** y **Veronica Flores Camacho** por estar presentes cuando más los necesitaba.

A mi director de tesina, **M.I. Jorge Quintana Castañeda**, por su guía, paciencia, conocimiento y dedicación brindada para poder realizar este trabajo de tesina.

A todas las personas que siempre brindaron su apoyo, cariño, y comprensión, y que sin ellos esto no sería posible.

# Resumen

---

A fin de cumplir con los objetivos mundiales a largo plazo, relacionados con el clima, calidad del aire y acceso indiscriminado a la energía eléctrica, el despliegue de las energías renovables aún necesita acelerarse, lo cual, va de la mano con la relación costo beneficio.

En este contexto, las aplicaciones solares y eólicas tienden a crecer rápidamente y así ocupar casi el 30% del total de la energía fotovoltaica instalada en México y aportar al creciente porcentaje de energía eólica que, aun que mas lento, gana terreno en la generación de energía.

Bajo el escenario descrito, en esta investigación de ingeniería, se expone una topología de conexión optima para la interconexión de sistemas de generación fotovoltaicos y eólicos.

A su vez la topología propuesta tiene ventajas sustanciales en la disminución de costos en la construcción de subestaciones de generación de fuentes renovables (eólica y solar) debido a que se ha podido prescindir de elementos, equipo primario, que comúnmente no es posible dejar de utilizar. Adicionalmente, con base al estudio de la contrición de transformadores de potencia, se concluyó en cambiar la conexión convencional del trasformador a una, que en aras de disminuir costos, se considera poco convencional pero que representa una sustancial mejora en tanto gestión de capital económico respecta.

Un análisis del uso de los arreglos de barras en subestaciones eléctricas de potencia y una comparación cualitativa respecto a otras estrategias de plantas de generación eólicas y solar demuestra la viabilidad técnica y económica de esta propuesta.

# Índice General

---

---

<i>Agradecimientos</i> .....	I
<i>Resumen</i> .....	II
<i>Índice General</i> .....	III
<i>Índice de Figuras</i> .....	V
<i>Índice de Tablas</i> .....	VI
<i>Glosario de Términos y Abreviaturas</i> .....	VII

## **Capítulo 1**

<b>Introducción</b> .....	1
1.1 Conceptos Generales de Arreglos de Barras en una Subestación .....	1
1.1.1 Subestación eléctrica .....	1
1.1.2 Arreglo de barras de una subestación .....	1
1.1.3 Equipos de transformación y alimentación de una subestación .....	2
1.1.4 Tensiones de operación de una subestación .....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Propuesta de Investigación .....	4
1.4 Objetivos .....	4
1.5 Justificación .....	4
1.6 Metodología .....	5
1.7 Organización .....	5
1.8 Contribución .....	6

## Capítulo 2

<b>Arreglo de Barras Empleadas en Subestaciones de Potencia</b> .....	7
2.1 Arreglos de Barras Existentes .....	8
2.1.1 Barra principal y barra de transferencia .....	8
2.1.2 Barra principal y barra auxiliar .....	10
2.1.3 Doble barra y barra de transferencia .....	12
2.1.4 Anillo .....	14
2.1.5 Interruptor y medio .....	16
2.1.6 Doble barra y doble interruptor .....	19
2.1.7 Barra simple .....	21
2.1.8 Barra simple con cuchilla de by pass .....	22
2.2 Clasificación de los Arreglos de Barras Existentes en Función del Nivel de Tensión .....	24
2.2.1 Tensión de 115 kV .....	24
2.2.2 Tensión de 230 kV .....	25
2.2.3 Tensión de 400 kV .....	25

## Capítulo 3

<b>Análisis de Arreglos de Barras para Subestaciones Eléctricas que Reciben Generación Solar y Eólica</b> .....	27
Topologías empleadas para subestaciones de generación eólica o solar .....	29

## Capítulo 4

<b>Conclusiones</b> .....	33
<i>Referencias</i> .....	34

# Índice de Figuras

---

## Capítulo 1

<i>Fig 1.1 - Nomenclatura de subestaciones nacionales</i> .....	2
---	---

## Capítulo 2

<i>Fig 2.1 - Arreglo de barra principal y barra de transferencia</i> .....	8
<i>Fig 2.2 - Arreglo de barra principal y barra auxiliar</i> .....	10
<i>Fig 2.3 - Arreglo de doble barra y barra de transferencia</i> .....	12
<i>Fig 2.4 - Arreglo de Anillo</i> .....	14
<i>Fig 2.5 - Arreglo de interruptor y medio</i> .....	17
<i>Fig 2.6 - Arreglo de doble barra y doble interruptor</i> .....	19
<i>Fig 2.7 - Arreglo de Barra Simple</i> .....	21
<i>Fig 2.8 - Arreglo de Barra Simple con Cuchilla de By-pass</i> .....	23

## Capítulo 3

<i>Fig 3.1 - Arreglo serie de transformador de potencia y línea de transmisión</i> .....	30
<i>Fig 3.2 - Arreglo serie para generación eólica y solar</i> .....	31

# Índice de Tablas

---

## Capítulo 1

<i>Tabla 1.1 - Niveles de tensión nominales en México .....</i>	3
---	---

## Capítulo 2

<i>Tabla 2.1 - Arreglo de barras en función del nivel de tensión .....</i>	26
--	----

## Capítulo 3

<i>Tabla 3.1 - Energía transmitida por centrales de generación solar y eólica en México ...</i>	28
---	----

# Glosario de Términos y Abreviaturas

---

87B	Protección 87 de barra
A	Ampere
ACSR	Conductor de aluminio con alma de acero
AP	Apartarrayos
BA	Barra auxiliar
BP	Barra principal
BT	Barra de transferencia
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
DB	Doble barra
DI	Doble interruptor
Fp ó fp	factor de potencia
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
SEN	Sistema eléctrico nacional
TC	Transformador de corriente
TO	Trampa de onda
TP	Transformador de potencial
TPC	Transformador de potencial capacitivo



# Capítulo 1

---

## Introducción

### 1.1 Conceptos Generales de Arreglos de Barras en una Subestación

#### 1.1.1 Subestación eléctrica

Una subestación es una instalación formada por equipos eléctricos cuyo objetivo es, según sea el caso, modificar o mantener los parámetros de un sistema eléctrico. Por ejemplo, conectando o desconectando un circuito de alimentación, aumentar o disminuir el nivel de tensión, conectando o desconectando elementos de compensación. [1.1]

Las principales funciones de una subestación son:

- Controlar la tensión y el flujo de energía en el sistema
- Medir, evaluar y monitorear los principales parámetros relacionados con las condiciones de operación del sistema (nivel de tensión, frecuencia, corriente)
- Ejecutar maniobras para hacer cambios en la configuración de la red
- Aislar las fallas que se presenten en la red
- Realizar maniobras de desconexión o libramiento de equipos

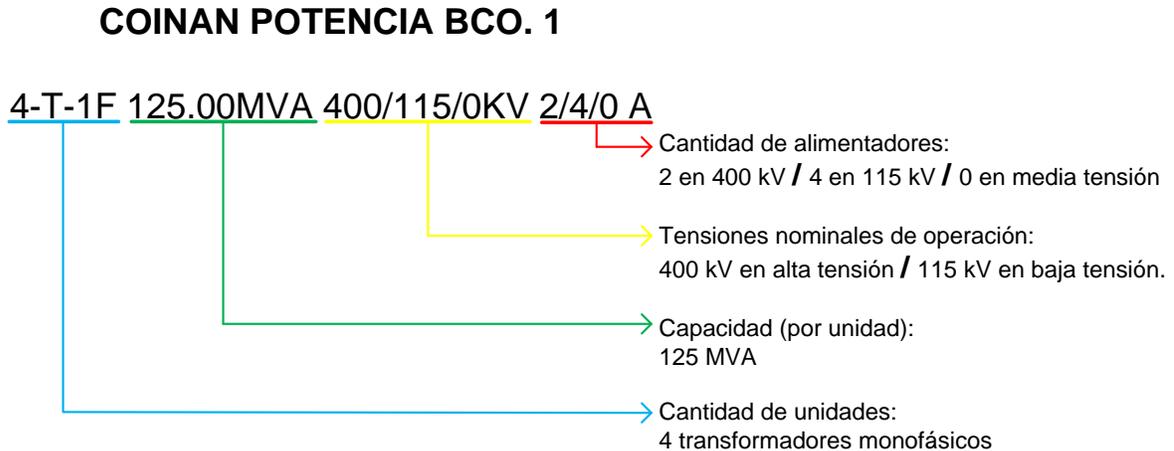
#### 1.1.2 Arreglo de barras de una subestación

El arreglo de barra de una subestación es la configuración ordenada de los elementos que la conforman, esta configuración incide en la funcionalidad, el costo y las dimensiones. Su elección depende del nivel de confiabilidad que se precise en el proyecto. [1.2]



### 1.1.3 Equipos de transformación y alimentación de una subestación

Las subestaciones nacionales han sido nombradas bajo la misma nomenclatura con el fin de estandarizar y facilitar su interpretación. Tomando como ejemplo la subestación Coinán Potencia Banco 1, la cual se compone con los siguientes elementos: [1.3]



*Fig. 1.1 - Nomenclatura de subestaciones nacionales*

### 1.1.4 Tensiones de operación de una subestación

Mundialmente existen distintos niveles de tensión a la cual trabajan los sistemas eléctricos de potencia, y esto depende de cada país y de los niveles de potencia que requiera transmitir, sin embargo, en México existen niveles de baja, media y alta tensión ya establecidos y estandarizados. [1.4]

Basado en la Tabla 1 de la ANSI C84.1-2020: Electric Power Systems Voltage Ratings, tropicalizando los niveles de tensión para su uso en México, y se han establecido los siguientes niveles de tensión para alta y media tensión. [1.4]



<b>Nivel de Tensión Nominal [kV]</b>	<b>Clasificación</b>
13.8	<b>Media Tensión</b>
23	
34.5	
69	<b>Alta Tensión</b> (Subtransmisión)
85	
115	
138*	<b>Alta Tensión</b> (Transmisión)
161*	
230	
400	<b>Extra Alta Tensión</b> (Transmisión)

*Tabla 1.1 – Niveles de tensión nominales en México*

\* En México se les llaman tensiones de uso restringido, debido a que no son de uso generalizado en el país.

## 1.2 Planteamiento del Problema

Existen diversas configuraciones que pueden emplearse para los arreglos de una subestación, pero no todas son óptimas para ser usadas en subestaciones de generación de energía, y mucho menos para ser usadas en subestaciones de generación de energías intermitentes como lo son la generación eólica y fotovoltaica.

Por ello es preciso definir aquellos arreglos de barras que cumplan de una mejor manera su función sin sacrificar confiabilidad ni eficiencia, ya sea que dicha generación de energía intermitente se encuentre conectada en una misma subestación con generación de energía convencional o se encuentre de forma independiente.



### 1.3 Propuesta de Investigación

En este trabajo de tesina, expondré las distintas configuraciones de arreglos de barras de subestaciones existentes, y analizaré cada una de ellas para clasificar los arreglos en función de su confiabilidad y utilidad en la generación conjunta o individual de parques fotovoltaicos y eólicos.

### 1.4 Objetivos

Encontrar una configuración óptima y confiable para su uso en subestaciones de generación fotovoltaica y eólicas ya sea como generación conjunta o individual, respetando en todo momento los lineamientos establecidos en la normativa mexicana referente a calidad de la energía.

### 1.5 Justificación

En los últimos años la demanda de energía renovable y la conciencia por el medio ambiente han desencadenado una creciente instalación de parques de generación fotovoltaica y eólica, lo que, a su vez, los estudios sobre dicha generación las ha colocado en un puesto muy importante en la obtención de energía eléctrica contemporánea. [1.5]

El uso generalizado de las configuraciones de barras de las subestaciones debe particularizarse para el uso en conjunto o independiente de la generación de energía fotovoltaica y eólica con el fin de obtener mayor eficiencia y evitar la salida de operación de una subestación debido a la intermitencia de la producción de energía eléctrica. [1.5]



## 1.6 Metodología

La metodología en la realización de esta tesina se detalla a continuación.

**Investigación de los Arreglos de Barras Existentes y Utilizados en las Subestaciones Eléctricas de Potencia en México.** Se enlistó y detalló los distintos tipos de arreglos de barras en subestaciones eléctricas de potencia, así como sus ventajas y desventajas, diagramas y el cálculo para determinar el número de cuchillas e interruptores según dispusiera el arreglo de barras.

**Análisis de la Información en Función de la Red Eléctrica Mexicana en la Actualidad.** Tomando en cuenta el estado actual del SEN y de la conexión en alta tensión de las distintas subestaciones de generación eléctrica, se determinó el número de alimentadores y la óptima configuración en la que estos deben estar conectados.

## 1.7 Organización

**Capítulo 2** Existen distintos tipos de arreglos de barras que son empleados en las subestaciones de potencia ejemplificando mediante diagramas unifilares las topologías, así como las ventajas y desventajas que cada arreglo.

Se clasificó el conjunto de arreglos de barras en función de la confiabilidad que se presenta en cada arreglo según el nivel de tensión, lo que consecuentemente se refleja en el número de alimentadores que se sugiere conectar, así como la importancia de la carga.

**Capítulo 3** Inicialmente se hizo un análisis de la capacidad de potencia que generan las centrales de generación eólica y solar en México, así como el nivel de tensión al cual se suele elevar del lado de alta tensión. Esto permitió determinar el número de alimentadores que se podrían utilizar en cada arreglo de barras de dichas subestaciones elevadoras y con el uso de diagramas de conexión del SEN se obtuvo el número de alimentadores comúnmente utilizados.



## 1.8 Contribución

Con esta tesina se demostrará de forma objetiva las configuraciones de los arreglos de barras de una subestación de generación eólica y fotovoltaica de modo que represente la mejor alternativa para su uso en condiciones de generación conjunta o de forma independiente a la generación de energía eléctrica convencional.

A su vez, expondrá los pros y contras del resto de configuraciones, para que puedan ser consideradas en subestaciones de generación de energía convencional.



# Capítulo 2

---

## Arreglo de Barras Empleados en Subestaciones de Potencia

En la actualidad existe una creciente concientización sobre la necesidad de utilizar energía renovable como una alternativa viable para satisfacer la demanda de energía de la población. Sin embargo, existe un gran problema que provoca la intermitencia en la generación de energía de los parques fotovoltaicas y de los parques eólicos.

Existen diversas causas por las cuales se ve reducida la generación de energía en los parques fotovoltaicos pero la más importante y evidente de todas es el anochecer. Por otro lado, en los parques eólicos sucede que la falta de viento genera un sece en la generación de energía. [2.1]

A raíz de esto, es necesario prever que la configuración del arreglo de barras utilizado sea el adecuado para que opere de forma óptima y evitar complicaciones de operación o protección en el resto de los elementos conectados a la subestación.

Hay diversas topologías de barras que pueden emplearse en las subestaciones y estas se clasifican, en parte, en función del nivel de tensión y confiabilidad.

En este trabajo de tesina, se consideran las tensiones nominales de operación de 115 kV, 230 kV, 400 kV. Y los arreglos que se consideraran para este análisis son los arreglos de barra principal y barra de transferencia, barra principal y barra auxiliar, doble barra y barra de transferencia, anillo, interruptor y medio, doble barra y doble interruptor, barra simple y barra simple con cuchilla de by pass. [2.1]

## 2.1 Arreglos de Barras Existentes

### 2.1.1 Barra principal y barra de transferencia

El arreglo de barra principal y barra de transferencia está formado por una barra (barra principal), a la cual están concertadas todos los elementos de la subestación y una segunda barra (barra de transferencia), la cual sirve como apoyo en caso de que se deba desconectar el interruptor de alguna bahía y no se desee suspender el suministro de energía.

En la barra principal se instalan tres transformadores de potencial para sincronización, medición y protección.

Dado que en este arreglo de barras una falla en la barra principal ocasiona la perdida de todos los elementos, resulta poco confiable y se debe considerar usar para el caso de tener pocos elementos. [2.1]

Es posible escalar este arreglo al arreglo de barra principal y barra auxiliar.

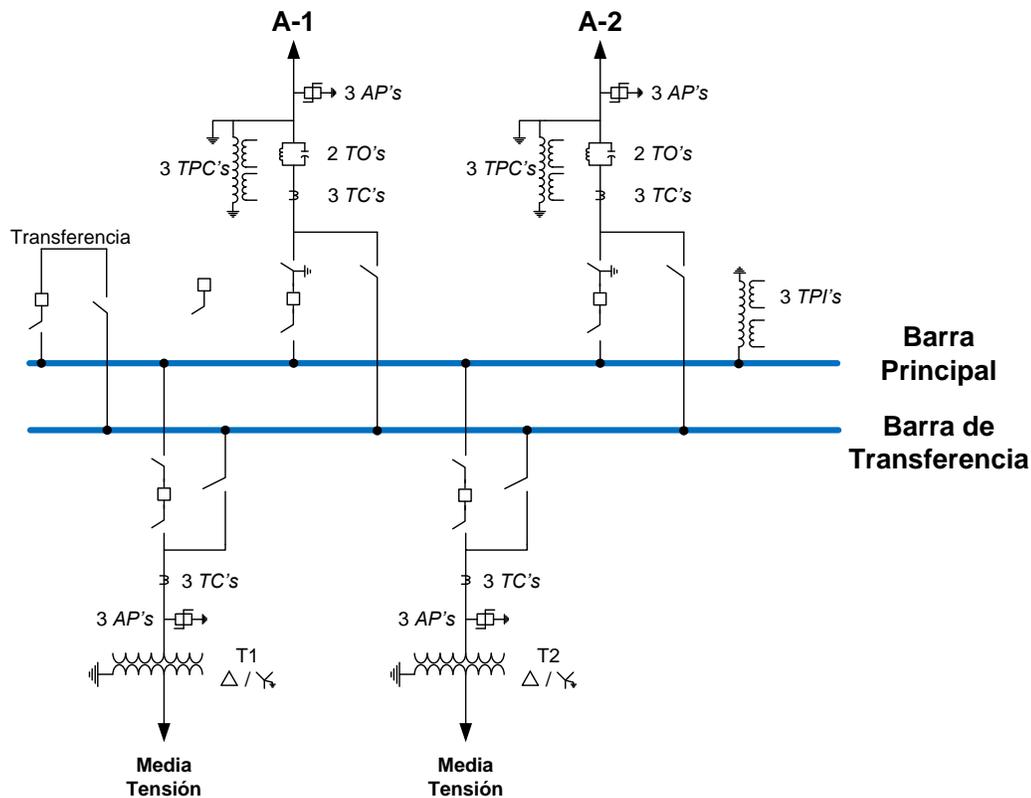


Fig. 2.1 - Arreglo de barra principal y barra de transferencia



En esta configuración de barras de debe transferir la protección del elemento conectado a la barra de transferencia al interruptor de transferencia, para que en caso de presentarse una falla en el elemento conectado esta pueda aislarse.

El arreglo de barra principal y barra de transferencia es usado comúnmente en tensiones de 115 kV y con pocos elementos (2,3,4).

Aunque también en tensiones de 230 kV y en subestaciones que nos sean tan importantes. [2.1]

### **Ventajas**

- Permite dar mantenimiento a los interruptores propios de los elementos sin perder elemento.
- Pocas maniobras para transferir elemento.
- En caso de falla solo sale de servicio el elemento fallado.
- Puede escalarse a BP y BA o bien a DB y BT, sin reacomodo de elementos.

### **Desventajas**

- Una falla en la BP ocasiona la perdida de todos los elementos.
- Se debe transferir el disparo al interruptor de transferencia para sustituir al interruptor del elemento.
- No se puede desenergizar la barra principal sin desconectar todos los elementos de la barra.
- Son muchos niveles, 3 para conectar todos los a elementos.
- El bus transversal que une ambas barras podría fallas ambas barras.

### **Elementos**

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow n+1$  Cuchillas  $\rightarrow 3n +2$

## 2.1.2 Barra principal y barra auxiliar

Este arreglo de barras debe tener la capacidad en cada una de las barras de transmitir la energía de todos los circuitos conectados, a su vez, la barra auxiliar puede funcionar como barra principal o barra de transferencia.

Su interruptor de amarre o transferencia conecta ambas barras para poder sustituir el interruptor de alguna de las bahías conectadas.

Este arreglo de barras tiene la capacidad de ser usado como dos subestaciones independientes debido a que es posible conectar unas bahías a la barra principal y otras a la barra auxiliar. [2.1]

Una falla en cualquiera de las barras ocasiona solo la pérdida de los elementos que se encuentran conectados a esa barra.

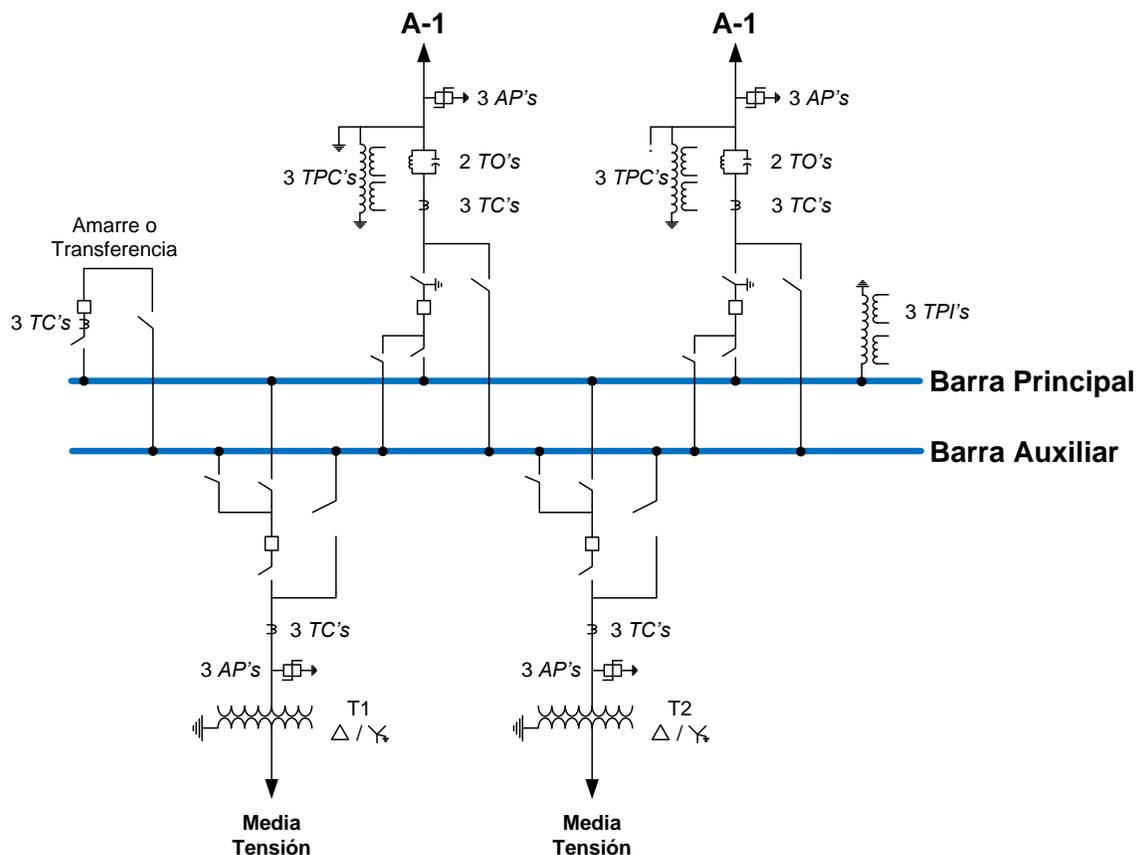


Fig. 2.2 - Arreglo de barra principal y barra auxiliar



Este arreglo de barras se usa comúnmente en tensión de 230 kV, con cantidad media de elementos (3,4,5) y cargas un poco más importantes. Y en 115kV con un poco más de elementos (4,5,6,7), pero de menos importancia. [2.1]

### **Ventajas**

- Permite dar mantenimiento sin perder el elemento.
- Una falla en una barra solo ocasiona la pérdida de los elementos conectados a esa barra.
- Permite desenergizar una barra entera sin perder los elementos de la subestación.
- Se puede usar el interruptor de amarre como protección de un elemento conectado mediante cuchilla de by pass.
- Permite ser usada como dos subestaciones de barra simple sin limitar la selección de elementos de cada barra.
- Se puede escalar a DB y BT, sin reacomodo de equipos.

### **Desventajas**

- Muchas maniobras para mudar un elemento de una barra a otra, además de ser necesario el bloque de la protección 87B.
- Se necesita transferir la protección del elemento al interruptor de transferencia para que este proteja al elemento.
- Se precisan tres niveles en la subestación (altura).
- Hay compromiso en la subestación debido a la configuración de los elementos que puede causar fallas en ambas barras de forma simultánea.

### **Elementos**

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow n+1$  Cuchillas  $\rightarrow 4n +1$

### 2.1.3 Doble barra y barra de transferencia

El arreglo de doble barra y barra de transferencia está formado por dos barras que están conectadas a todos los elementos de la subestación y por una barra (barra de transferencia) para el caso en el que se deba desconectar el interruptor de algún elemento.

Adicionalmente, cuenta con un interruptor (interruptor de amarre) que conecta la barra uno y la barra dos, y un interruptor (interruptor auxiliar) que conecta ambas o alguna de las barras a la barra auxiliar. [2.1]

Este arreglo permite operar la una subestación con esta configuración de barras como dos subestaciones independientes, y en caso de que en alguna de las barras se presente una falla solo se perderían los elementos conectados a dicha barra.

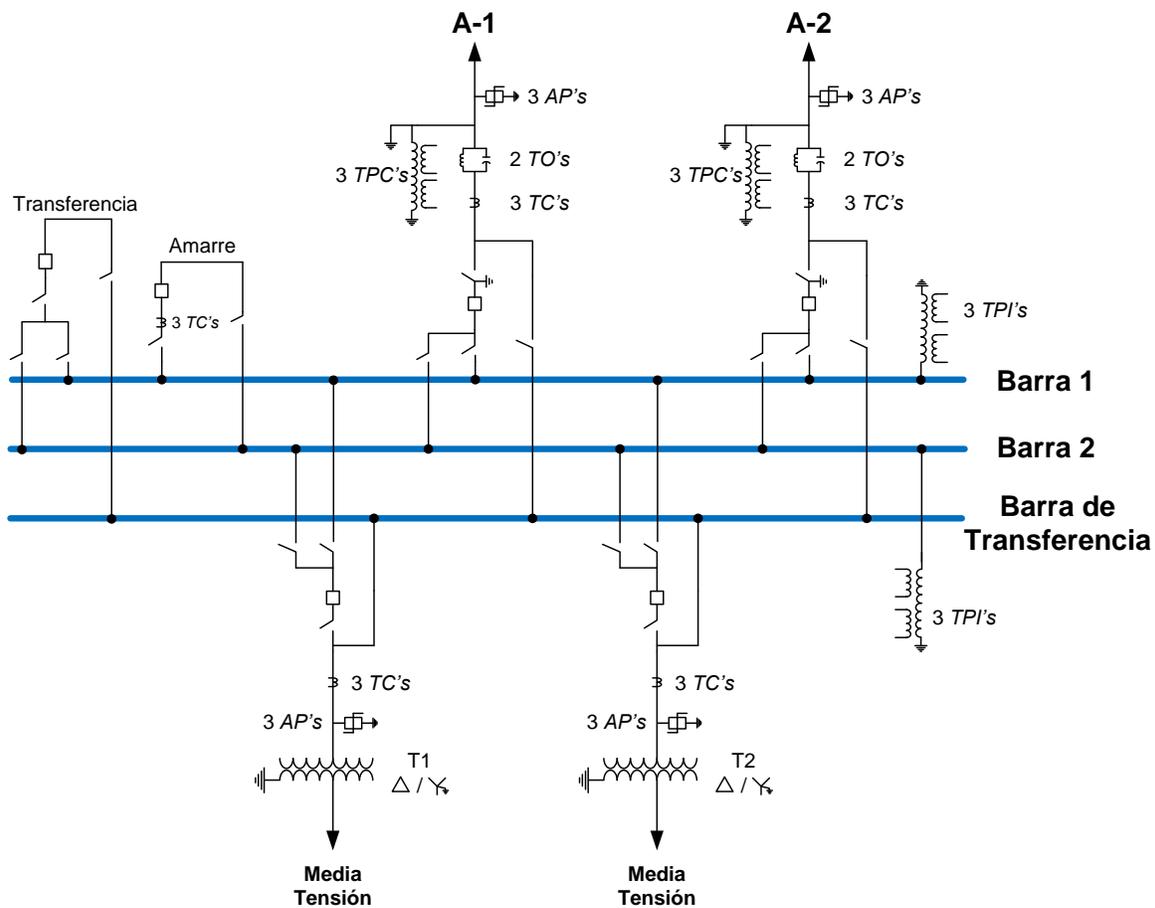


Fig. 2.3 - Arreglo de doble barra y barra de transferencia



Esta configuración de barras es capaz de manejar una cantidad importante de elementos (5,6 o más) y de distinta naturaleza (generación, líneas y transformación). Con niveles de tensión de 115 kV y 230 kV, así como algunas cargas importantes de 400kV. [2.1]

### **Ventajas**

- Pocas maniobras para usar el interruptor de transferencia.
- Da mantenimiento a los elementos sin perderlos.
- La falla en una barra ocasiona la pérdida de los elementos conectado a esa barra sin importar que esté conectado el interruptor de transferencia.
- Permite desenergizar cualquier barra para mantenimiento sin perder elementos.
- Una falla en un elemento conectado a la barra de transferencia protegido por el interruptor de transferencia solo ocasiona la desconexión de dicho elemento.
- Permite ser usada como dos subestaciones independientes, sin limitar en número de elementos en cada barra.

### **Desventajas**

- Se transfieren los disparos al interruptor de transferencia cuando este se está usando.
- En 400 kV, se generan transitorios magnéticos, debido a maniobras, que se agravan con la longitud de la barra.
- Son arreglos de alto relieve, tres niveles.

### **Elementos**

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow n+2$  Cuchillas  $\rightarrow 4n +5$

### 2.1.4 Anillo

El arreglo de anillo se caracteriza por conectar los elementos entre si mediante un interruptor, obteniendo una configuración de elementos que asemeja a un anillo.

Esta topología no cuenta con alguna barra donde puedan conectarse los elementos de la subestación, por lo que para poder tener una medición de los parámetros eléctricos se instalan los transformadores de potencial en las bahías de línea.

Dado que no existen barras a las cuales los elementos estén conectados, en caso de existir una falla en algún elemento este se desconecta mediante sus interruptores adyacentes y no se ve afectado ningún otro elemento.

Se usan comúnmente los arreglos de 2 transformadores y dos líneas de transmisión, o tres líneas de transmisión y un transformador. No hay posibilidad de crecimiento ni de escalamiento. Es un arreglo poco confiable. No para subestaciones urbanas debido a su poca confiabilidad. [2.1]

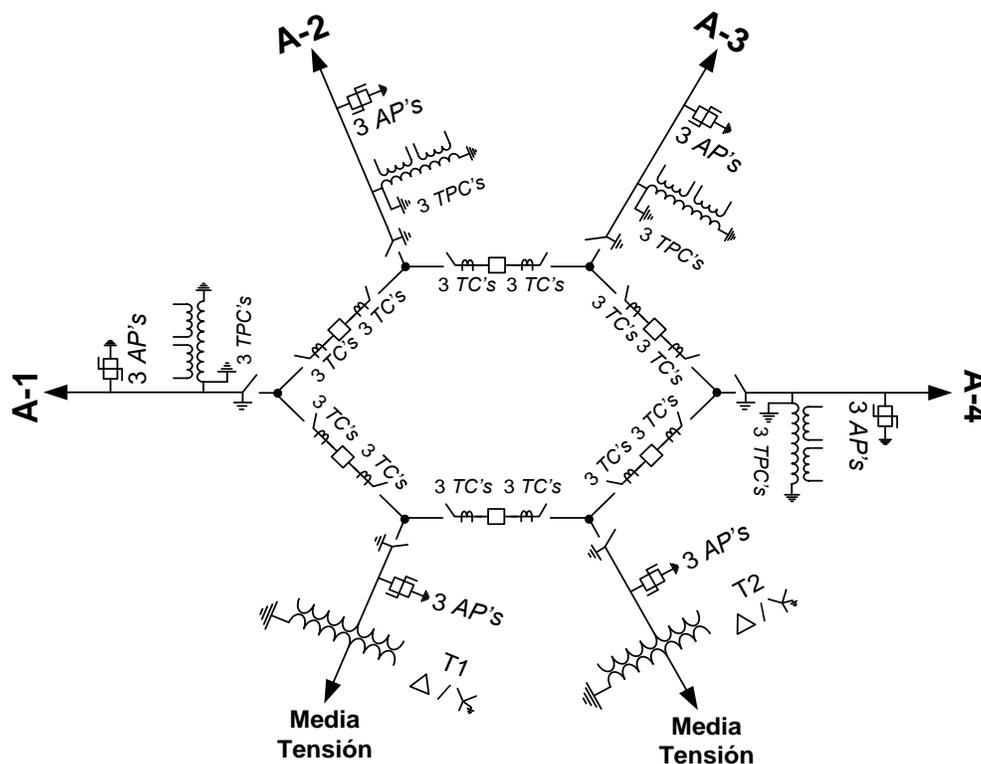


Fig. 2.4 - Arreglo de anillo



El caso típico en el que se emplea este arreglo de barras es en niveles de tensión no mayores a 115 kV y con pocos elementos (4 comúnmente, no más), por lo que debido a su poca confiabilidad no se recomienda para subestaciones importantes. [2.1]

### **Ventajas**

- Permite dar mantenimiento a un interruptor sin perder ningún elemento, pocas maniobras para liberar elementos.
- Arralde bajo relieve, dos niveles.
- Requerimiento mínimo de marcos estructurales.

### **Desventajas**

- Con un interruptor en mantenimiento, el disparo de un interruptor puede causar la pérdida de otros elementos.
- Alto grado de compromiso de los elementos con el arreglo de la subestación.
- Para realizar ampliaciones es necesario romper el anillo.
- El respaldo de protección debido a falla de interruptores adyacentes del elemento fallado no es local. Esto es inconveniente si se comparte el arreglo con generadores y transformadores

### **Elementos**

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow n$

Cuchillas  $\rightarrow 3n$



### 2.1.5 Interruptor y medio

En el arreglo de barras de interruptor y medio se cuentan con dos barras y un interruptor en medio del arreglo. En esta topología cada elemento se conecta mediante dos interruptores, un interruptor propio que es adyacente a la barra y al elemento en cuestión, y mediante al interruptor medio que lo conecta con otro elemento y que en caso de no existir este otro elemento lo conecta con la otra barra del arreglo.

En este arreglo de barras a la conexión de dos elementos conectados mediante tres interruptores se le conoce como una rama completa.

Debido a que esta configuración precisa la conexión de una rama mediante tres interruptores, la topología tiene gran flexibilidad y en caso de presentarse una falla en alguna de las barras ningún elemento se desconectaría, y en caso de que algún elemento presentara una falla solo se desconectaría este elemento sin afectar a ningún otro.

Para poder aprovechar en mayor medida este arreglo de barras es conveniente conectar en una rama un elemento de generación de energía y uno que presente una carga; dos elementos de generación o dos elementos de carga no son recomendados.

Es un arreglo recomendable para subestaciones de muchos elementos, no menos de dos ramas completas y a partir de 5 elementos. Se debe combinar generación con carga o generación con generación en la misma rama o en si se trata de una apertura de línea colocar ambos extremos en la misma rama. [2.1]

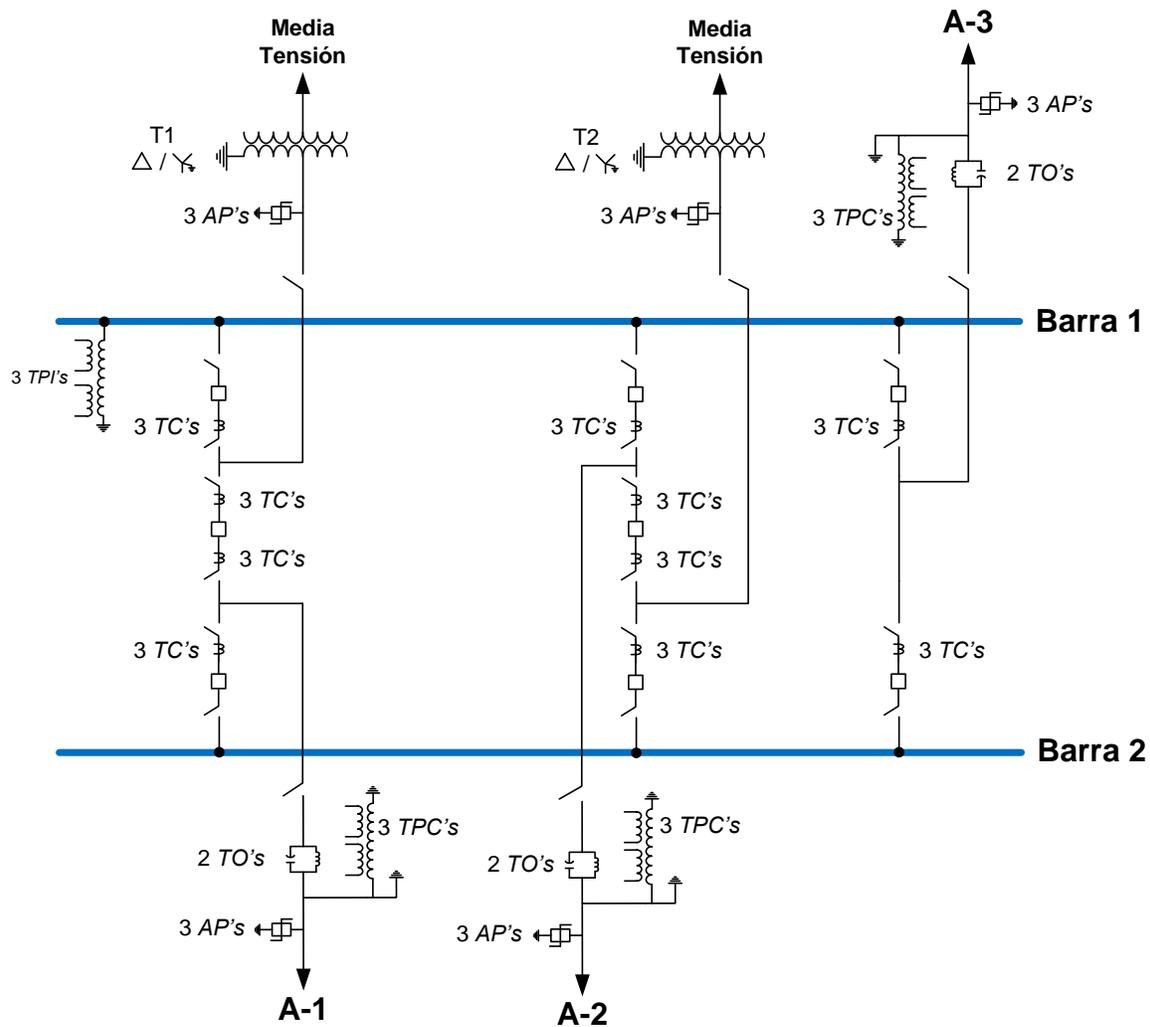


Fig. 2.5 - Arreglo de interruptor y medio

Generalmente se usa en subestaciones importante con un nivel de tensión de 400kV por su importancia. También se puede utilizar niveles de tensión de 115 kV y 230 kV pero cuando hay 6 o 7 elementos y cuando es importante la subestación. [2.1]

### Ventajas

- Permite dar mantenimiento a un interruptor sin perder ningún elemento, incluso a más de un elemento, siempre que no sea de la misma rama.
- Pocas maniobras para liberar interruptores.



- La pérdida de una barra no ocasiona la pérdida de ningún elemento.
- La pérdida de ambas barras ocasiona la pérdida entre ramas, pero no entre los elementos de la misma rama.

### Desventajas

- Cuando un interruptor está en mantenimiento, el disparo de un elemento puede causar la pérdida de otros elementos.
- Riesgo de falla en ambas barras debido al conductor trasversal.
- No para menos de 3 elementos, quedarían interruptores en serie.
- El respaldo por falla de interruptor en interruptores adyacentes a líneas de transmisión no es local, lo cual es inconveniente cuando se tiene un transformador o un generador en la misma rama.
- Dada la configuración en “U” de la subestación, una falla en una barra podría provocar una falla en ambas barras simultáneamente, o explosión de un TC o desprendimiento de cadenas de aisladores, pero son de baja probabilidad de ocurrencia.
- Configuración de alto relieve, tres niveles.

### Elementos

$n_1 \rightarrow$  # elementos en ramas completas

$n_2 \rightarrow$  # elementos en ramas  
incompletas

Interruptores  $\rightarrow 1.5 n_1 + 2 n_2$

Cuchillas  $\rightarrow 4 n_1 + 5 n_2$



### 2.1.6 Doble barra y doble interruptor

El arreglo de doble barra y doble interruptor cuenta con dos barras principales a la cual están conectadas cada elemento de la subestación mediante dos interruptores.

Dada la topología de este arreglo, la subestación puede configurarse para que opere como dos subestaciones independientes. [2.1]

En caso de presentarse una falla en alguna de las barras los elementos solo se desconectan de la barra y siguen conectados al resto del arreglo, y en caso de presentarse una falla en algún elemento esta solo se aísla abriendo los interruptores adyacentes al elemento fallado.

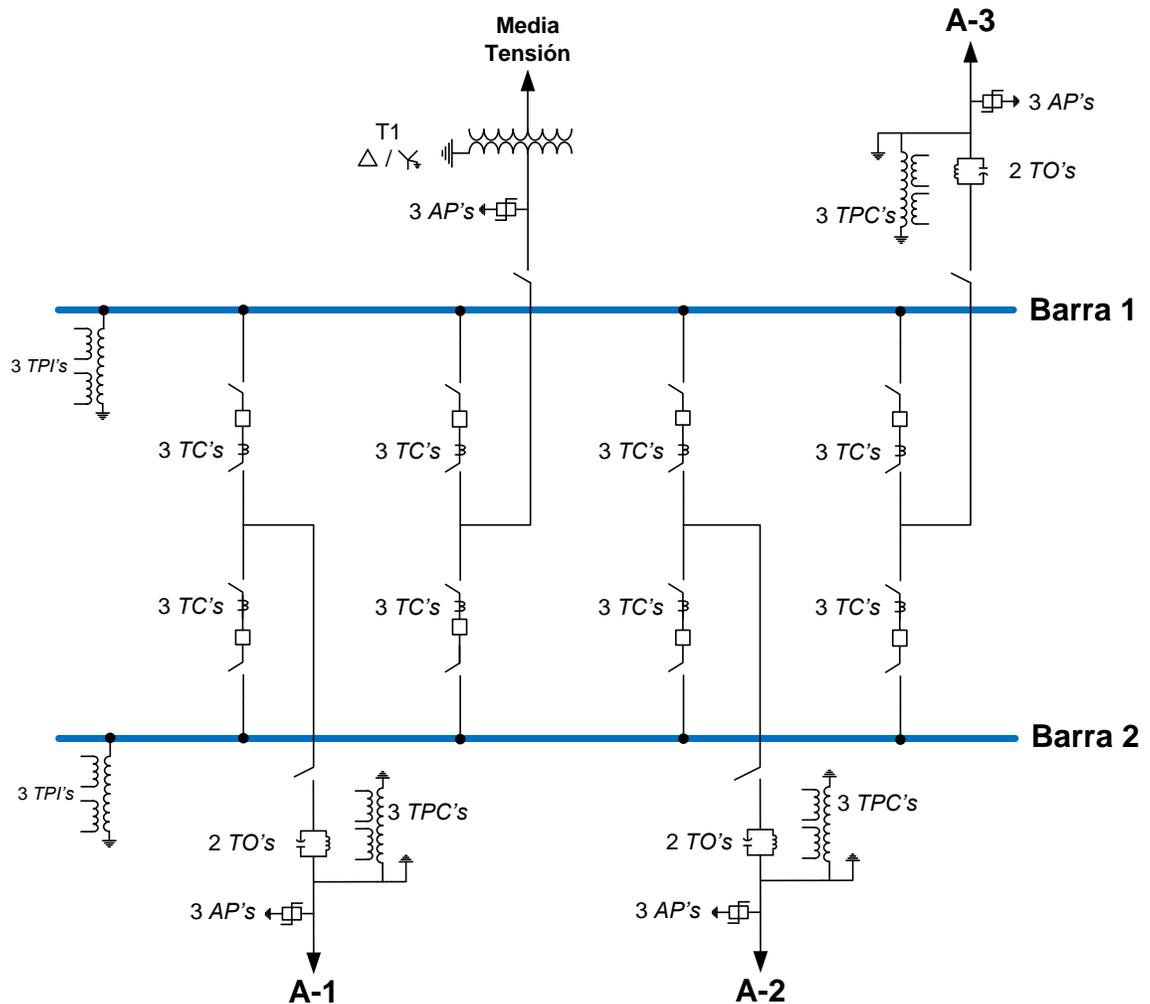


Fig. 2.6 - Arreglo de doble barra y doble interruptor



Es un arreglo de barras apto para subestaciones de medio a muchos elementos. Sería conveniente combinar ramas de generación y carga, o generación y generación o si se trata de una apertura de línea colocar ambos extremos en la misma rama. Arreglo físicamente confiable, por lo que se puede usar en niveles de tensión de 230 kV y 400 kV y con un número alto de elementos (5,6,7 o más).

### **Ventajas**

- Permite dar mantenimiento a los interruptores por rama, sin perder el elemento.
- Pocas maniobras para liberar interruptores.
- La pérdida de una barra no ocasiona la pérdida de ningún elemento.
- Con un interruptor en mantenimiento, la falla de un elemento no ocasiona la pérdida de otro elemento, solo la pérdida del elemento fallado.
- El mantenimiento de una barra no causa la pérdida de ningún elemento.
- Permita que la subestación sea usada como dos subestaciones independientes.

### **Desventajas**

- La configuración precisa relieve alto, tres niveles.

### **Elementos**

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow 2n$

Cuchillas  $\rightarrow 5n$



### 2.1.7 Barra simple

El arreglo de barra simple cuenta con una sola barra donde se conectan todos los elementos de la subestación. Cada elemento cuenta con un interruptor para poder ser aislado en caso de presentarse una falla en dicho elemento.

Dada la topología del arreglo, en caso de presentarse una falla en la barra principal, se pierden todos los elementos de la subestación. En el caso de dar mantenimiento al interruptor de algún elemento es necesario sacar de servicio dicho elemento. [2.1]

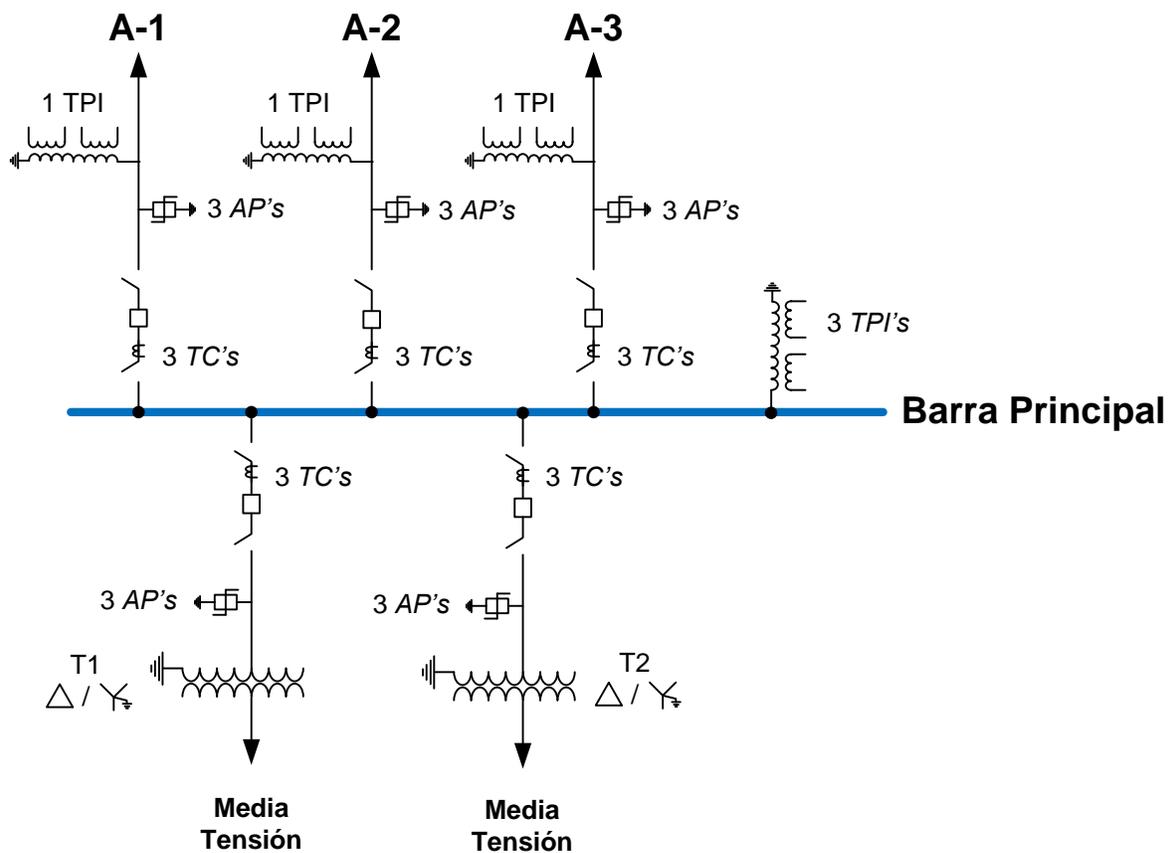


Fig. 2.7 – Arreglo de Barra Simple



Es un arreglo poco confiable y no deben conectarse elementos importantes (4 o 5 por mucho), además de usarse en niveles de no más de 115 kV.

### **Ventajas**

- Con el mantenimiento de un interruptor de cualquier elemento, el disparo de un elemento causa la salida de solo ese elemento.
- La configuración permite bajo relieve, dos niveles.

### **Desventajas**

- El mantenimiento de un interruptor implica la pérdida de dicho elemento.
- Una falla en la barra principal ocasiona la pérdida de todos los elementos.
- En caso de falla de operación de un interruptor, para aislarla la falla de toda aportación se libera mediante la desconexión de todos de todos los elementos de la barra.

### **Elementos**

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow n$

Cuchillas  $\rightarrow 2n$

## **2.1.8 Barra simple con by-pass**

El arreglo de barra simple con by-pass es prácticamente el mismo que el arreglo de barra simple, con la excepción de que, en el caso de requerirse mantenimiento en uno de los interruptores de algún elemento, este no necesitará salir de operación. Sin embargo, en caso de presentarse una falla en la barra principal o en el elemento en mantenimiento, este no podrá desconectarse de la barra principal. [2.1]

A su vez, en caso de presentarse una falla en la barra principal se perderán todos los elementos de la subestación.

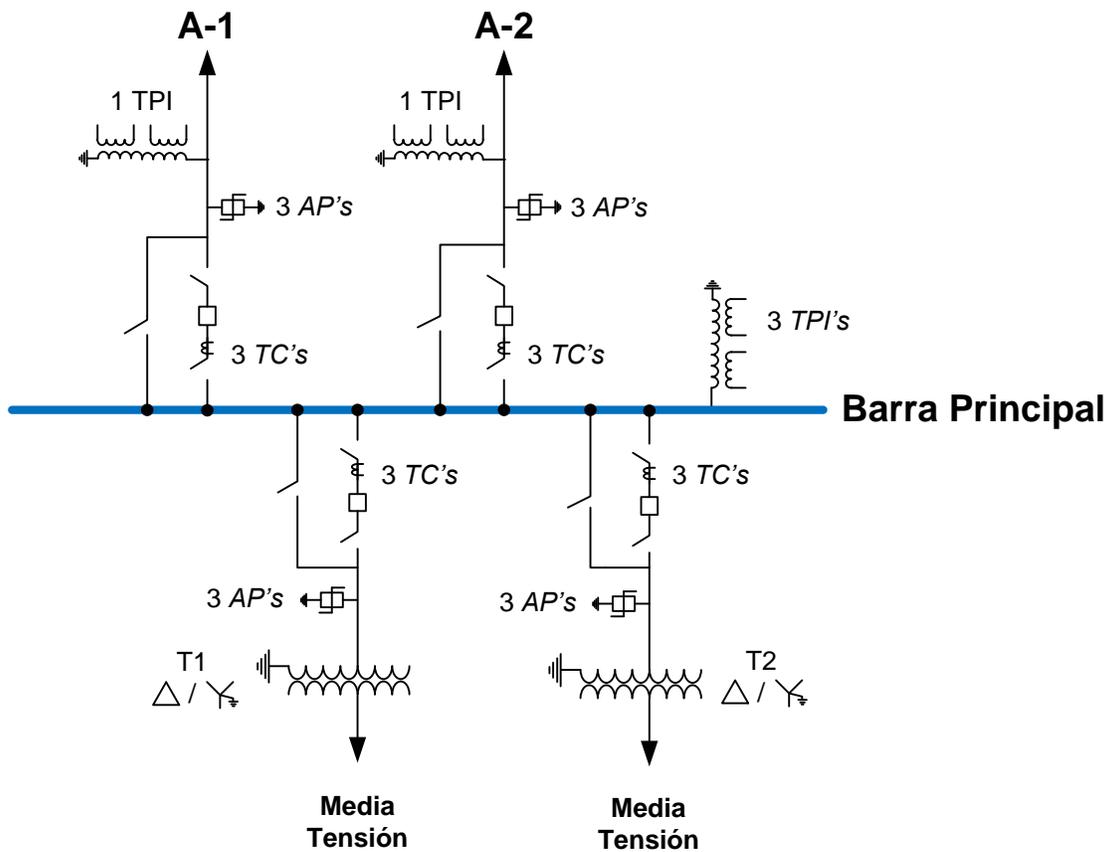


Fig. 2.8 – Arreglo de Barra Simple con Cuchilla de By-pass

Es un arreglo poco confiable y no deben conectarse elementos importantes (4 o 5 por mucho), además de usarse en niveles de no más de 115 kV. [2.1]

### Ventajas

- Con el mantenimiento de un interruptor de cualquier elemento, el disparo de un elemento causa la salida de solo ese elemento.
- La configuración permite bajo relieve, dos niveles.
- Permite dar mantenimiento al interruptor sin perder el elemento.

### Desventajas

- Una falla en la barra principal ocasiona la perdida de todos los elementos.



- En caso de falla de operación de un interruptor, para aislarla la falla de toda aportación se libera mediante la desconexión de todos de todos los elementos.
- En caso de falla de un elemento conectado con cuchilla de by pass, para aislarla la falla de toda aportación se libera mediante las protecciones remotas y la desconexión de todos de todos los elementos de la barra.

### Elementos

$n \rightarrow \# \text{ elementos}$

Interruptores  $\rightarrow n$

Cuchillas  $\rightarrow 3n$

## 2.2 Clasificación de los Arreglos de Barras Existentes en Función del Nivel de Tensión

### 2.2.1 Tensión de 115 kV

Este nivel de tensión es de subtransmisión, los elementos conectados a estos arreglos de barras son más relevantes, pero no demasiado. Los arreglos que cumplen con la confiabilidad para este nivel de tensión son:

- Barra principal y barra de transferencia
- Barra simple
- Barra simple con cuchilla de by pass

Para estos arreglos de barras es posible conectar hasta 4 o 5 elementos. También es posible conectar el arreglo de anillo, barra principal y barra auxiliar, doble barra y barra de transferencia e interruptor y medio.

Los arreglos de doble barra y barra de transferencia e interruptor y medio tienen la confiabilidad para poder conectar una mayor cantidad de elementos (5,6 o 7) y elementos con mayor importancia. [2.1]



### 2.2.2 Tensión de 230 kV

Este nivel de tensión es de transmisión, los elementos conectados a las barras de este nivel de tensión son de mayor importancia, como aperturas de líneas de transmisión medianas y largas, cargas de la industria de importancia.

Los arreglos que cumplen con la confiabilidad para este nivel de tensión son:

- Barra principal y barra de transferencia
- Doble barra y barra de transferencia
- Doble barra y doble interruptor

En estos arreglos el número de elementos conectados es mayor a los de menor tensión (5,6,7 o más) y son de alta confiabilidad.

Para estos arreglos es necesario configurar los elementos de forma que en la misma rama se tenga generación y carga o generación y generación, de ser posible y para asegurar la menor pérdida de energía cuando ocurra cualquier falla. [2.1]

### 2.2.3 Tensión de 400 kV

Este es el nivel máximo de tensión de transmisión en México actualmente, los elementos conectados a las barras de subestaciones en este nivel de tensión son los más importantes.

Los arreglos que cumplen con la confiabilidad para este nivel de tensión son:

- Interruptor y medio
- Doble barra y doble interruptor

En estos arreglos el número de elementos conectados es mayor a los de menor tensión (5,6,7 o más) y son de alta confiabilidad.

El arreglo de doble barra y barra de transferencia también se puede usar en este nivel de tensión, pero no con demasiados elementos.



Para estos arreglos es necesario configurar los elementos de forma que en la misma rama se tenga generación y carga o generación y generación, de ser posible y para asegurar la menor pérdida de energía cuando ocurra cualquier falla. [2.1]

**Tabla 2.1** – Arreglo de barras en función del nivel de tensión

		Niveles de Tensión		
		115 kV	230 kV	400 kV
Arreglo de Barras	<b>BP y BT</b>	••		
	<b>BP y BA</b>	•	••	
	<b>DB y BT</b>	•	••	•
	<b>Anillo</b>	•		
	<b>Interruptor y Medio</b>	•	•	••
	<b>DB y DI</b>		••	••
	<b>Barra Simple</b>	••		
	<b>Barra Simple con cuchilla de by pass</b>	••		

- → Arreglo más utilizado para el nivel de tensión seleccionado.
- → Arreglo poco utilizado para el nivel de tensión seleccionado.



# Capítulo 3

---

## Análisis de Arreglos de Barras para Subestaciones Eléctricas que Reciben Generación Eólica o Solar

Para poder determinar el arreglo de barras a emplear es necesario conocer el número de alimentadores que requiere la planta de generación. El número de alimentadores está en función de la potencia generada y el nivel de tensión en el que se necesite transmitir, lo que se traduce en corriente inyectada en la línea de transmisión y a su vez en corriente en los conductores, los cuales tienen una ampacidad que debe respetarse.

Para aclarar lo antes mencionado se emplearán las siguientes formulas.

$$I = \frac{P}{V \text{ fp } \sqrt{3}}$$

Donde:

I → Amperes [A]

P → Potencia Generada [W]

V → Tensión de operación del sistema en alta tensión [V]

fp → factor de potencia de la planta generadora.

Existen un gran número de plantas de generación solar, con generación que va desde 1 MW hasta 220 MW, y tres niveles de tensión a la cual se eleva para la conexión con las líneas de transmisión del SEN, los cuales son 115 kV, 230 kV y 400 kV.



Con objeto de cumplir con el Código de Red y sus requerimientos, el factor de potencia de la planta de generación debe ser no menor a 0.97. [3.4]

Es necesario puntualizar que para el nivel de tensión de 115 kV se usa un conductor por fase, para 230 kV se usa de uno o dos conductores por fase y para 400 kV tres conductores por fase. [3.1]

Con dichas consideraciones se presenta la tabla siguiente.

**Tabla 3.1 – Energía transmitida por centrales de generación solar y eólica en México**

Potencia Generada [MW]	Nivel de Tensión [kV]	Tecnología	Corriente del lado de alta por fase [A]	Conductores por fase	Corriente en el lado de alta, por conductor [A]
1	115	Solar	5.18	1	5.18
5	115	Solar	25.88	1	25.88
10	115	Solar	51.76	1	51.76
30	115	Solar / Eólica	155.27	1	155.27
50	115	Solar / Eólica	258.79	1	258.79
70	115	Solar / Eólica	362.30	1	362.30
100	115	Solar / Eólica	517.57	1	517.57
120	115	Solar / Eólica	621.09	1	621.09
	230		310.54	2	155.27
150	115	Solar / Eólica	776.36	1	776.36
	230		388.18	2	194.09
170	230	Solar / Eólica	439.94	2	219.97
200	230	Solar / Eólica	517.57	2	258.79
220	230	Solar / Eólica	569.33	2	284.66
250	230	Solar / Eólica	646.96	2	323.48
	400		372.00	3	124.00
300	400	Solar / Eólica	446.40	3	148.80
350	400	Solar / Eólica	520.81	3	173.60
400	400	Solar / Eólica	595.21	3	198.40
450	400	Eólica	669.61	3	223.20
500	400	Eólica	744.01	3	248.00
550	400	Eólica	818.41	3	272.80
600	400	Eólica	892.81	3	297.60
700	400	Eólica	1041.61	3	347.20



800	400	Eólica	1190.41	3	396.80
900	400	Eólica	1339.21	3	446.40
1000	400	Eólica	1488.02	3	496.01

En el caso de las plantas de generación solar, la corriente suministrada al sistema es, en su mayoría, inferior a 1,000 amperes; lo cual representa una gran ventaja pues la ampacidad del conductor más utilizado, en la actualidad en los sistemas eléctricos de potencia, es el ACSR 1113. Este cuenta con una ampacidad de 1,090 amperes.

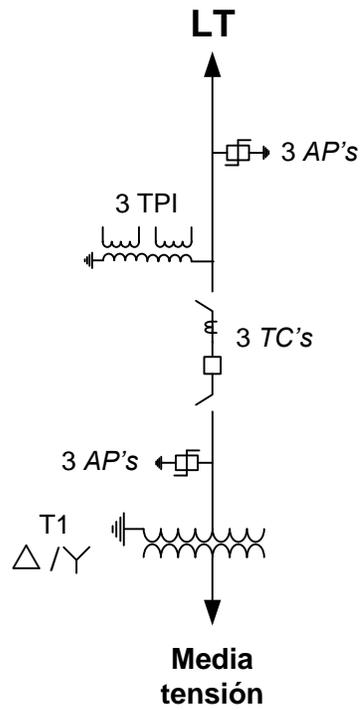
Para el caso de los parques eólicos, la capacidad de generación de potencia oscila entre 30 MW y 1,000 MW. [3.1]

## Topologías empleadas para subestaciones de generación eólica o solar

Como se abordó anteriormente, es necesario determinar la cantidad de alimentadores que se necesitan para desahogar la cantidad de energía producida por la planta de generación ya sea eólica o solar. La cantidad de corriente que se produce es fácilmente transportada por el conductor que típicamente se utiliza en las líneas de transmisión, ACSR 1113, el cual posee una ampacidad de 1090 amperes.

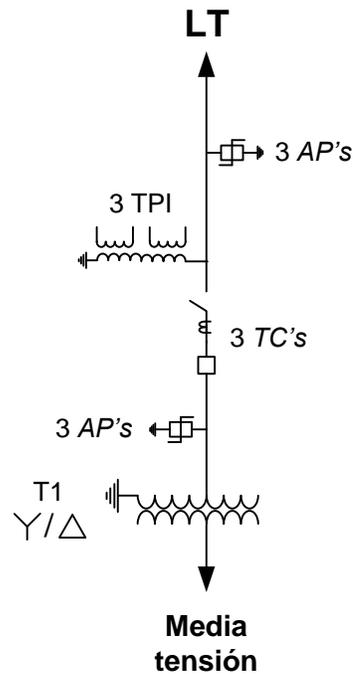
Por dicha razón, no se propone implementar arreglos de barras en las subestaciones que reciben generación eólica o solar, debido a que basta con un solo alimentador de la línea de transmisión para evacuar la energía generada. Así que la conexión con la línea de transmisión se produce mediante una conexión en serie del transformador de potencia y la línea de transmisión.

La figura 3.1 presenta la conexión en serie de un solo alimentador y la línea de transmisión.



**Fig. 3.1** – Arreglo serie de transformador de potencia y línea de transmisión

Sin embargo, se propone en la configuración mostrada en la figura 3.2 con objeto de optimizar el arreglo serie para los parques de generación eólica y solar de un solo alimentador que no requieren de la implementación de barras en la subestación.



**Fig. 3.2** – Arreglo serie para generación eólica y solar

En esta configuración se ha eliminado la cuchilla aguas abajo del interruptor. Lo que presenta un cambio al uso típico de tener un interruptor situado en medio de sus cuchillas adyacentes.

Se puede prescindir de esta cuchilla porque una vez que el interruptor se abre, y posteriormente la cuchilla aguas arriba del interruptor se abre, el transformador queda correctamente aislado del lado de la línea de transmisión. Subsecuentemente, solo se requiere abrir en interruptor del transformador del lado de baja tensión para poder tener completamente desconectado el transformador de potencia y el interruptor de alta tensión. De esa manera poder maniobrar dichos equipos de forma segura.

Como parte de la configuración que se propone, la figura 3.2 muestra la conexión de los devanados del transformador de potencia, donde comúnmente la conexión es delta-estrella, sin embargo, la conexión propuesta en este trabajo de tesina es estrella-delta, esto debido a que existen ventajas económicas al construir los devanados del transformador de esta manera.

[3.2] [3.3]



Es preciso, con objeto de disminuir gastos en la construcción del transformador de potencia de la subestación, considerar que el devanado del lado de alta tensión esté conectado en estrella y consecuentemente, el lado de baja tensión esté conectado en delta.

Si se utiliza una conexión delta en el lado de alta tensión, todas las conexiones deben poseer un aislamiento completo, lo que significa que debe estar aislado al nivel completo de prueba para alta tensión. Tal configuración será más costosa que una con aislamiento graduado que se encuentre con conexión en estrella. [3.2] [3.3]

En el devanado de baja tensión no hay desventaja económica si se dispone el devanado en conexión delta, ya que el aislamiento en esta configuración no representa un costo considerable en comparación con un aislamiento completo de una conexión delta, como sí se presenta en el caso de alta tensión. [3.3]



# Capítulo 4

---

## Conclusiones

En este trabajo de tesina se propusieron las ventajas y desventajas de los distintos arreglos de barras de subestaciones con base en sus topologías, nivel de tensión, y número de elementos a conectar para poder tener la mayor confiabilidad de cada arreglo.

Se ha propuesto una topología que favorece la implementación de subestaciones eléctricas de potencia en plantas de generación eólica y solar, donde el mayor beneficio se ve reflejado en el menor número de equipo primario y conexión del transformador de potencia, lo que a su vez supondría una menor inversión en la construcción de la subestación elevadora.

Se ha concluido, mediante la información de generación eléctrica en las plantas de generación eólica y solar en México, la inobservancia de arreglos de barras en las subestaciones elevadoras en dichas plantas; esto debido a que la potencia generada y el nivel de tensión al cual se conectan estas subestaciones, permiten un solo conductor por fase y no conectar a la subestación más de un alimentador a la línea de transmisión; y así prescindir del uso de arreglos barras en las subestaciones.

Se eliminó la cuchilla aguas abajo del interruptor del lado de línea en la subestación; dado que dicha cuchilla resultaba redundante en la topología propuesta.

Se han dispuesto los devanados del transformador de potencia en conexión estrella-delta; dicha configuración presenta el cambio de aislamiento completo por aislamiento graduado en los devanados.



# Referencias

---

- [1.1] González Suarez A. & Molina Vega E., “Diseño de una subestación eléctrica para alimentar un sistema de agua contra incendio en un complejo procesador de gas”, marzo 2013.
- [1.2] Centro Nacional de Control de Energía CENACE, “Diagramas unifilares del sistema eléctrico nacional 2018-2023”, Programa de Ampliación y Modernización 2018-2032.
- [1.3] Secretaria de Energía SENER, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2015-2029”.
- [1.4] NEMA Communications Department, “ANSI C84.1-1995, Electric Power Systems and Equipment-Voltage Ratings (60 Hertz)”, June 13, 2005.
- [1.5] Bnamericas, “Los principales 10 proyectos solares y eólicos listos para su construcción en México”, 10 de julio 2020.
- [1.6] Forbes, “Energía Solar Fotovoltaica”, 16 de agosto 2017.
- [2.1] Dirección Corporativa de Ingeniería y Proyectos de Infraestructura, “Manual de Diseño Electromecánico para Subestaciones de Transmisión”
- [3.1] M.I. Jorge Quintana Castañeda, “Listado de centrales de generación eólica y solar”, agosto de 2019.
- [3.2] “Electrical Engineering and Science for Manufacturing Applications”, industrial-electronics.com
- [3.3] Normalización Española, UNE-EN 60076-3 “Power Transformer Part-3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”, 19 September 2018.
- [3.4] Comisión Reguladora de Energía, “Código de Red”, 8 de abril del 2016.