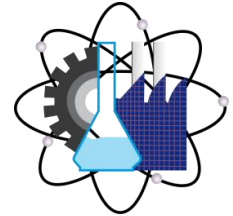




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE MORELOS**



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

## **FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**

---

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**“Microredes Eléctricas: Estructura, Análisis y  
Parámetros Eléctricos”**

TESIS PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

**ING. HEBERT GODÍNEZ ENRÍQUEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. J. GUADALUPE VELÁSQUEZ AGUILAR**

Cuernavaca, Morelos, México

Noviembre 2020.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA**  
Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGC certificado en la norma ISO 9001:2015

Secretaría de Investigación y Posgrado

FORMATO T-2  
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA  
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 10 de noviembre de 2020.

**Dr. Mario Limón Mendoza**  
**Dr. Outmane Oubram**  
**Dra. Martha Roselia Contreras Valenzuela**  
**Dr. Roy López Sesenes**  
**Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar**  
**PROFESORES DE LA FCQEI**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Hebert Godínez Enriquez titulada: "Microredes Eléctricas: Estructura, Análisis y Parámetros Eléctricos" realizada bajo la dirección del Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**ENCARGADA DE DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DE LA FCQEI**

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**ENCARGADA DE DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DE LA FCQEI**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

**D I C T A M E N**

<b>NOMBRE</b>	<b>VOTO</b>	<b>FIRMA</b>
Dr. Mario Limón Mendoza		
Dr. Outmane Oubram		
Dra. Martha Roselia Contreras Valenzuela		
Dr. Roy López Sesenes		
Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar		



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2020-11-10 17:56:40 | Firmante qFUKMR7 TwCvqjZHI3WbTRNSaNsSRxKR1piTaboPbbR2z7hmgC4HkL1wEaO3TeSThcXADYz6rFz a2oPSIaGPqpP1BBTIV8oPIGTIFFqHo2BATulrM3Z2dCw-PostKjeJkma1 YIS Jd62ktw2O98yxs/sIDQIJHN/ XdpMo/qjhXKdctNn4gRYkrNSOvLaAwBLV3R5d2Z5j-113ONwrS7InJm58sCRVuuJ-11RQjmkwiciY3W3GXyEviCYzjq6Ta2PIB1UFwknY32OdIB2bdE US4lgAwuo7796Mt9qONRzWm6sOcoAdJv5YmcC-1jDO2ubqj8mE5j-5QZjmlLsyQ--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR Ingresando la siguiente clave:



H46BaS

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/4Rag3Ci8IGbPS0JRuQ8weRbXPVHtkn2>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRONICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

**Sello electrónico**

**MARIO LIMON MENDOZA** | Fecha:2020-11-10 19:57:55 | Firmante  
 mUoTApT5qyDPmhr4YTT2uPY0A5tZCO2om8yHx+WJivLeT37feZ6d5yF7S+Aw5mbyQBd9lPq7LTc38UAAFYFhC6n26cHkxC3akYQZqMgm9ZBL2vtQ8/4RoyI9Eylf1mBN45Ygz7B5XlnVM54QPpyCb4XT+HjF5yr+CO3fM8quHDNwWrvj5XvtrCS1o1nx4EyyMs4OvEnwbic4hHKsx+8KvP3nmbwPoOAdw0ZJYuCWD1l9nCi3aJ13o+7LVHiv433H535oNp9NZ9PHR08YPI17uSg1eWRg2+2+HjmrqMynVUM40wEDyvyD3CJsMtgvyM6MAWHYQ--

**ROY LOPEZ SEENES** | Fecha:2020-11-10 20:00:49 | Firmante  
 Yg7A+NscLDrj5SsBRzxcPIPLPF6VTQs1HHb8K28hyhQV4LzIQP+pw2rh8x6q84e4onSuhVQYQZeb9hrynsMbu81AUBJEVrTfGgvWnRbCCO7TD8BTGd6AwfDkUxBo1qag392A146tUyJTDZVuyWH7W6cIXAwS36GmGHGd+4l/Ue5PCrEYj6pvz1oSTqgkE3HNGVfy2lCpXJ9SLGq6cLD8pE6zBqrqgTvwLmV5APJ5PC2C63NQI8+g7epjA1YlK0BgNA460vRz+7gCPDfKZJUDMn7NJKJHKVJXDEsyVv9v6tBoj+aZ52ULAYhNbyhoejBulvPJFny63dEpbQ--

**MARTHA ROSELIA CONTRERAS VALENZUELA** | Fecha:2020-11-11 01:09:33 | Firmante  
 CX1Br3ZXsxdDeAOVkrSv9+U+Hglu/YZis9r2DBnyp4UZTeAs9401PXBILC6reom6xJJMDva2cA2c2FcPKWuEqJs2AsUK5BDQqf0nOa5ld7vFyMwKRYzqyD05tU7CRRedYr/Pv0xYFwRmK4HpvQlZC7/8r3FVFKzqwZ4xOvJvisjtw/3tMr6meWyzY7KCUBBhjWqcn+KKZE5zeF1tEbKYujxL56mUbeIQhmq+Q180gvsej8kXpdOXIAPr6Sufxemx7bVc4vtYbetVruJF0tpaK4X0IH0D6S8V+6Xa1UduxzGnEhElnaVlqOGsaodjHgpGXWlpo0x26Pg--

**OUTMANE OUBRAM** | Fecha:2020-11-14 18:54:20 | Firmante  
 A+eFMwEp7n8TQG4nvP6aVxJxbhSbZ83NVVYKmx+pcavEzuiuMunnYZntObaP6IEJk7AXdSrJ7TKdogb9BCBFmP1x1UqJw5NrlU0KuXm2lksGaO59lIdcGgwE7QNNNewWXZ3Olc7zy0mXveJFqZGTJTFGvQHEw0WfnTnS06OKT1Xbs9ULB0K8NocyMa14s5A1o1SFQVof2VRYPs0vF6Q1wcBSX6NlJrWkC1q0o2sNgFUkXOZKlyhY6eFdB65DIRAKraX5BhM0kou4JKR4GbkjNpkIYnLZXvez12aa1PnkMwg9pvx9dmOMyWpU5l0SdQdPqraej6A--

**J GUADALUPE VELASQUEZ AGUILAR** | Fecha:2020-11-17 09:23:16 | Firmante  
 DqLULmK3XsnmLWlv+wToGp162zWZUHDaT3TUsm/cAHbyEZqNgQqsuASVJnV+alHGd2wGIRA1XQVfJ4cxIX5XV4Fh5qkNfOWghvGzww4LK1Okmv23428UBu+Z9/qQTQ+MQJX01TtzvNnaQo21QRmObBGW5jwPueE1E7sk7p1xgQfc36aVYM1VvWtUEt3acXhwCiaR3N2zWRuzrLLJ8SQzFzJ7Q4HtrUjSnhJebzKQcYXTM4NXpONbSI04CE7JZXXk+I8HNb2zVczkUvW005vjMqTYXZLPIR3oQc7NQH1W47oJM3Aaftgm25V5AaYk4u1DTPnyg--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR. Ingresando la siguiente clave:



Rq2fM5

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/DBtaM7XPDoeclupOxjUIU47X1waBTgk>



# Dedicatorias

A mi Dios creador supremo estoy muy agradecido por la vida, por iluminarme, por tenerme de pie para enfrentar los contrastes de la vida, y de darme fuerzas para continuar adelante y dar el bien a mi familia y a mis semejantes.

A mis abuelos Eulogia Santos Tolentino†, Marciano Godínez Abad†, Isidra Mijangos†, José Enríquez Onofre†, Cirenio Vázquez† por su amor incondicional, por sus consejos y enseñanzas en mi vida temprana, e historias que forjaron mi vida para enfrentar la realidad, que dios me los cuide.

A mis padres Enriqueta Enríquez Mijangos y Francisco Godínez Santos†, quiénes con su amor eterno, me enseñaron los valores fundamentales, estoy muy agradecido que me guiaron por el trabajo fuerte para salir adelante. A mi mamá Francisca Alvarado Alonso le agradezco su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis padrinos Victorina Ocaña Alonso† y Manuel A. Arana Mendoza†, quiénes con sus consejos, me apoyaron incondicionalmente en mi carrera profesional, que dios los tenga en su gloria.

A mi esposa Yazmin por su gran amor incondicional y paciencia, por su gran apoyo, comprensión en este periodo de cambios; a mi hija Yazbeth por su apoyo, paciencia y ejemplo para continuar por el camino del saber.

A mis hermanos Marilú, María Elena, Graciela, Fleury, Anita, Marisela, Víctor y Guadalupe, por el amor fraternal y por el apoyo moral para continuar con mis objetivos trazados en mi vida.

# Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos UAEM y a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería FCQI, por la oportunidad de brindarnos el espacio y tiempo, así como conjuntar las ideas con un grupo de ingenieros ansiosos con manifestaciones de desarrollarse profesionalmente.

A los catedráticos de la Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Dr. J. Guadalupe Velásquez, Dr. Luis Cisneros, Dr. Mario Limón, Dr. Mario Acosta, Dr. Outmane Oubram, Dr. Roy López, Dra. Viridiana León, Dr. Gerardo Vera, por su dedicación, profesionalismo y entusiasmo que ayudaron a mi formación académica.

A mis compañeros de maestría Alberto, Alejandro de Jesús, Gustavo, Carlos, Enrique, Aristeo, Eduardo, Cosmos, Omar, Alberto, por el trabajo en equipo y apoyo para que este proceso iniciado llegara al final.

Al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias por el apoyo otorgado para continuar este bello camino de mi desarrollo profesional.

A la empresa ETAP - Operation Technology Inc. y a ETAP Latinoamérica ([www.etap.com](http://www.etap.com)) por sus gestiones y apoyo incondicional para la utilización de una licencia para el desarrollo de mi trabajo de tesis.

# Resumen

A nivel mundial se están desarrollando las Redes Eléctricas Inteligentes (Smart Grids por su definición en inglés), con base en esta tendencia tecnológica también se están desarrollando las microrredes. El objetivo de estos nuevos sistemas es aprovechar los recursos energéticos principalmente renovables para algún sitio en particular y para incrementar la confiabilidad por ejemplo de una red de distribución, aunque también existen las microrredes aisladas para electrificar viviendas y comunidades rurales aisladas de las Redes Generales de Distribución.

Este trabajo de tesis se ha desarrollado con el objetivo de conocer la estructura eléctrica y los estudios eléctricos necesarios para la integración de una microrred, con la finalidad de generar energía eléctrica y de establecer que el aprovechamiento a pequeña escala de los recursos energéticos es técnicamente factible. En México por los diferentes recursos energéticos renovables que existen, se pueden desarrollar microrredes en las ciudades, o en las zonas rurales. En las ciudades, también existen los recursos renovables suficientes y también existen espacios físicos los cuales se ubican en zonas industriales, zonas habitacionales, zonas escolares y otros lugares públicos, inclusive existen espacios que podrían utilizarse en las instalaciones militares. Los recursos que pueden utilizarse, son los recursos energéticos del sol, la fuerza del viento, o del agua; por otra parte, dependiendo de los esquemas de la microrred propuesta, tanto para la generación, como para la red de distribución y del perfil de demanda analizado, en ocasiones es necesario apoyarse con recursos no renovables como el gas o diésel, esto para complementar la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución o para extender la energía (watts-hora) por la noche o en días con poco sol o viento.

Este trabajo de tesis describe como realizar el análisis de una microrred, se analizan las definiciones en la normativa internacional, se explican algunos ejemplos de microrredes a nivel mundial y en el sector militar, y algunos sistemas en México, así como algunos esquemas de operación.

También se define la topología de una microrred, los componentes eléctricos y se analizan los requerimientos técnicos para su integración.



Se analiza con la herramienta ETAP la topología de una microrred, con estudios de corto circuito, flujos de carga y calidad de potencia se verifica su comportamiento. Se analizan diversos escenarios de operación en modo interconectado a una red de distribución.

También se analiza con la herramienta Matlab una microrred utilizando modelos predefinidos en la herramienta Simulink, ejemplificando de esta forma que las herramientas computacionales, permiten apoyar en la etapa de planeación y posteriormente en la etapa de operación de una microrred.

Finalmente, se concluye que las microredes nos permiten aprovechar los recursos energéticos que existen en un sitio en particular. Incentivan la participación de la sociedad diversificando las fuentes de generación, y también incrementan la confiabilidad cuando este tipo de sistemas se interconecta a una red de distribución.

# Abstract

Smart Grids (Smart Grids for its definition in English) are being developed worldwide, based on this technological trend, microgrids are also being developed. The objective of these new systems is to take advantage of mainly renewable energy resources for a particular site and to increase the reliability, for example, of a distribution network, although there are also isolated microgrids to electrify homes and rural communities isolated from the General Distribution Networks.

This thesis work has been developed with the aim of knowing the electrical structure and electrical studies necessary for the integration of a microgrid, in order to generate electrical energy and to establish that the small-scale use of energy resources is technically feasible. In Mexico, due to the different renewable energy resources that exist, microgrids can be developed in cities, or in rural areas. In cities, there are also sufficient renewable resources and there are also physical spaces which are located in industrial zones, residential areas, school zones and other public places, there are even spaces that could be used in military installations. The resources that can be used are the energy resources of the sun, the force of the wind, or water; On the other hand, depending on the schemes of the proposed microgrid, both for the generation and for the distribution network and the demand profile analyzed, sometimes it is necessary to rely on non-renewable resources such as gas or diesel, this to complement the reliability of the electrical distribution system or to extend power (watt-hours) at night or on days with little sun or wind.

This thesis work describes how to perform the analysis of a microgrid, the definitions in international regulations are analyzed, some examples of microgrids are explained worldwide and in the military sector, and some systems in Mexico, as well as some operation schemes.

The topology of a microgrid, the electrical components and the technical requirements for their integration are also defined.

The topology of a microgrid is analyzed with the ETAP tool, with short circuit studies, load flows and power quality, its behavior is verified. Various operating scenarios are analyzed in an interconnected mode to a distribution network.

A microgrid is also analyzed with the Matlab tool using predefined models in the Simulink tool, exemplifying in this way that computational tools allow support in the planning stage and later in the operation stage of a microgrid.

Finally, it is concluded that microgrids allow us to take advantage of the energy resources that exist in a particular place. They encourage the participation of society by diversifying generation sources, and also increase reliability when this type of system is interconnected to a distribution network.

# Contenido

<i>Dedicatorias</i> .....	1
<i>Agradecimientos</i> .....	2
<i>Resumen</i> .....	3
<i>Abstract</i> .....	5
<b>CAPÍTULO I</b> .....	12
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
1.1. <i>Antecedentes</i> .....	13
1.2. <i>Planteamiento del problema</i> .....	17
1.3. <i>Objetivos</i> .....	18
1.3.1 <i>Objetivo General</i> .....	18
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	18
1.4. <i>Justificación</i> .....	19
1.5. <i>Beneficios</i> .....	19
1.5.1 <i>Beneficios para la compañía eléctrica:</i> .....	19
1.5.2 <i>Beneficios para los usuarios:</i> .....	19
1.5.3 <i>Beneficios para el ambiente:</i> .....	19
1.6. <i>Metodología para el desarrollo del proyecto</i> .....	20
1.7. <i>Alcances del proyecto de tesis</i> .....	20
<b>CAPÍTULO II</b> .....	21
<b>TOPOLOGÍA DE LA MICRORRED</b> .....	21
2.1 <i>Definiciones</i> .....	22
2.2 <i>Regulación técnica en los países</i> .....	24
2.3 <i>Controladores en microrredes</i> .....	24
2.4 <i>Topología de un Sistema Eléctrico</i> .....	25
2.5 <i>Descripción de equipos que integran la microrred eléctrica</i> .....	29
2.6 <i>Especificaciones de los equipos principales de la microrred</i> .....	30
<b>CAPÍTULO III</b> .....	38
<b>ESTUDIOS ELÉCTRICOS. Análisis del comportamiento de la microrred</b> .....	38
3.1 <i>Introducción</i> .....	39
3.2 <i>Descripción de la microrred en estudio</i> .....	42
3.3 <i>Escenarios de operación</i> .....	42

<b>3.4 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO CON ESTUDIOS ELECTRICOS DE LA MICRORRED ELECTRICA.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.1 Estudios de corto circuito .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.2 Estudios de flujos de potencia.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4.3 ESTUDIOS CALIDAD DE POTENCIA .....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>57</b>
<b>ANÁLISIS DEL MODELO DE UNA MICRORRED DE 150 kW .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1 Introducción .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 Antecedentes.....</b>	<b>58</b>
<b>4.3 Descripción del modelo y su estructura.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4 Representación del modelo y estructura.....</b>	<b>67</b>
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>75</b>
<b>CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y NECESIDADES EN MÉXICO. ....</b>	<b>75</b>
<b>5.1 Conclusiones.....</b>	<b>76</b>
<b>5.2 Trabajos futuros.....</b>	<b>77</b>
<b>5.3 Necesidades en México. ....</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>85</b>

# Índice de Figuras

<b>Figura 1.1 Diagrama unifilar de la microrred Fort Sill [8].</b> .....	<b>16</b>
<b>Figura 2.1 Diagrama de flujo de control simplificado de una microrred [18].</b> .....	<b>25</b>
<b>Figura 2.2 Diagrama unifilar de una microrred básica.</b> .....	<b>27</b>
<b>Figura 2.3 Topología del modelo experimental de la microrred.</b> .....	<b>28</b>
<b>Figura 3.1 Diagrama unifilar de la microrred eléctrica 150 kW</b> .....	<b>41</b>
<b>Figura 3.2 Valores de falla trifásica de la microrred 150 kW.</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 3.3 Valores de falla trifásica de la microrred 150 kW (impedancia del T1 modificada).</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 3.4 Valores de falla monofásica de la microrred eléctrica 150 kW</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 3.5 Valores de falla monofásica de la microrred eléctrica 150 kW (impedancia modificada de 4.5 a 9%)</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 3.6 Resultados de flujos de potencia de una microrred eléctrica 150 kW</b> .....	<b>48</b>
<b>Datos iniciales del escenario base:</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 3.7 Resultados de flujos de potencia de una microrred eléctrica 150 kW</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 3.8 Resultados de estudios de flujos de carga de una microrred eléctrica 150 kW. Caso base 1</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 3.9 Resultados de estudios de flujos de carga de una microrred eléctrica 150 kW. Caso base 1</b> .....	<b>53</b>
<b>Figura 3.10 Diagrama unifilar con THD's en barras y enlaces.</b> .....	<b>54</b>
<b>Figura 3.11 Diagrama unifilar con THD's en barras y enlaces.</b> .....	<b>55</b>
<b>Figura 3.12 Forma de onda de tensión en el bus2_A</b> .....	<b>55</b>
<b>Figura 3.13 Espectro de frecuencias en el bus2_A</b> .....	<b>56</b>
<b>Figura 4.1 Diagrama unifilar de la microrred eléctrica.</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 4.2 Panel con 60 celdas solares (acotaciones en mm).</b> .....	<b>62</b>
<b>Figura 4.3 Diagrama unifilar de una celda solar</b> .....	<b>63</b>
<b>Figura 4.4 Curvas I-V de un panel solar fotovoltaico (305 W)</b> .....	<b>65</b>
<b>Figura 4.5 Curvas P-V de un panel solar fotovoltaico (305 W)</b> .....	<b>65</b>
<b>Figura 4.6 Ejemplo de parámetros eléctricos reales de diferentes modelos de módulos solares</b> .....	<b>66</b>
<b>Figura 4.7 Curvas I-V, P-V del panel solar de referencia</b> .....	<b>68</b>
<b>Figura 4.8 Modelo físico de una microrred eléctrica.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 4.9 Potencia de salida (1 módulo serie, 32 en paralelo)</b> .....	<b>71</b>
<b>Figura 4.10 Potencia de salida (2 módulos serie, 32 en paralelo)</b> .....	<b>71</b>
<b>Figura 4.11 Potencia de salida (2 módulos serie, 64 en paralelo)</b> .....	<b>72</b>

<b>Figura 4.12 Potencia de salida (2 módulos serie, 128 en paralelo) .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4.13 Pantalla de salida del modelo físico de la microrred eléctrica.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4.14 Red de distribución 23000/220 V del modelo físico de la microrred eléctrica .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4.15 Gráfica de irradiación y generación fotovoltaica .....</b>	<b>74</b>

# Abreviaturas

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
ATS	Interruptor de transferencia automática.
CA	Corriente alterna.
CD	Corriente directa.
CHP	Fuente de generación eléctrica y calor.
DER	Fuentes de generación distribuida.
GD	Generación distribuida.
EMS	Sistema de administración de la Energía.
IEC	Comité Electrotécnico Internacional.
RGD	Red General de Distribución, con tensiones de operación 13.8, 23 y 34.5 kV.
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
MPPT	Maximum Power Point Tracking
STC	Standard Test Condition (de un panel solar)



# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN.**

---

En este capítulo se describe el concepto de las microredes con base en la normativa. Se analizan algunos ejemplos y desarrollos que se encuentran en operación en el mundo, inclusive en instalaciones militares. Se describen los objetivos, el planteamiento del problema, la justificación del porque se realiza este tema de tesis, los beneficios del desarrollo de microredes tanto para la compañía eléctrica, usuarios y el ambiente, así como la metodología de desarrollo.

## **1.1. Antecedentes**

A nivel mundial el uso de las nuevas tecnologías de generación de energía renovable es cada vez mayor e importante. Un ejemplo es la República Popular China, donde la generación con energías renovables en los dos últimos años ha crecido en más del 50%. En Estados Unidos existen campos agrícolas que están rentando partes de sus tierras para la instalación de parques fotovoltaicos, los propietarios indican que ante la baja de precios de ciertos productos agrícolas obtienen mejores ingresos por la renta de sus tierras para la instalación de estos sistemas de generación, especialmente en zonas cercanas a instalaciones eléctricas, ya que los integradores de las plantas fotovoltaicas buscan los espacios más cercanos a los puntos de interconexión con la red eléctrica. En el caso de la generación distribuida, los pequeños productores en medios rurales, fraccionamientos y pequeños industriales, buscan la interconexión de sus redes eléctricas internas con las redes de distribución; los pequeños productores abastecen sus procesos con generación propia y en ocasiones los excedentes son entregados a la red de distribución. Estas secciones de red y equipamiento se han definido como microrredes [1-3], tienen la característica de tener una infraestructura con generación propia, tienen cargas, un sistema de distribución de baja y/o media tensión, un sistema de control y comunicaciones para su control local, su operación puede ser en forma aislada o en forma interconectada con la red de distribución.

Por otra parte, el departamento de Energía de Estados Unidos [5] define las microrredes como un grupo de cargas interconectadas y fuentes de energía distribuidas (DER's por sus siglas en inglés) como un sistema eléctrico definido y que actúa como una entidad controlada con respecto a la red eléctrica de distribución y puede conectarse y desconectarse de la red eléctrica, esto permite que funcione en modo interconectado con la red eléctrica de distribución, como la operación en modo isla. Con base en esta definición, la instalación de DER's podrían considerarse como una microrred siempre y cuando se establezcan las tres características siguientes:

1. El sistema eléctrico debe tener bien definido sus límites o fronteras.
2. El sistema debe tener integrado un controlador maestro que realizará las funciones de control y operación tanto de los DER's como de las cargas, el cual funcionará como una sola entidad eléctrica.
3. La capacidad de generación de los DER's debe ser mayor que la carga crítica pico, de esta forma la microrred podría desconectarse de la red eléctrica de

distribución, por ejemplo, podría operar en modo isla y perfectamente alimentar las cargas críticas.

Estas características adicionales de las microredes la definen como un sistema de potencia de pequeña escala, con la capacidad de autoalimentarse y operar en forma de isla, para distribuir y regular la energía para las cargas internas.

Por otra parte, las microredes se definen como sistemas que tienen mayores ventajas que los sistemas tradicionales de respaldo, es decir, tienen un mayor rango de beneficios y son más flexibles en su operación.

En [6] la microrred se define como redes de pequeña escala, donde la alimentación es con fuentes de potencia y calor (CHP, por sus siglas en inglés) en baja tensión, diseñadas para alimentar cargas eléctricas y calor para pequeños sistemas. Se pueden utilizar en localidades urbanas o suburbanas, académicas como escuelas o universidades, locales comerciales, industria, fincas, etc. Las microredes son esencialmente una red de distribución activa, porque integra generación distribuida y cargas diferentes, conectadas en el nivel de la tensión de distribución. También en [6] se establece que las pequeñas fuentes utilizadas para integrar una microrred son sistemas renovables no convencionales. Estos se integran para generar energía a un mismo nivel de tensión, y son equipados con interfaces con electrónica de potencia y controles para establecer una flexibilidad operativa del sistema, el cual debe mantener una potencia en la salida con una calidad de potencia definida en estándares.

Para mejorar la confiabilidad y reducir los costos de la energía, la base militar Fort Bragg, de EE.UU. cerca de Fayetteville en Carolina del Norte [8], planeó la construcción de una de las microredes más grandes del mundo. Con el apoyo de la compañía Honeywell, Fort Bragg ha integrado una variedad de tecnologías de generación distribuida que trabajan en conjunto con la red eléctrica. Cubriendo más de 100 millas cuadradas, Fort Bragg posee su propia red de distribución y es capaz de controlar su generación desde un centro de gestión de la energía. A pesar de su tamaño, las distintas tecnologías de generación están totalmente integradas con la red de distribución, aprovechando la información de las tecnologías y la infraestructura de las comunicaciones. Fort Bragg tiene como resultado una microrred inteligente, los responsables del sistema han informado que ha mejorado la confiabilidad eléctrica, y ha logrado una reducción en los costos de energía eléctrica.

En forma similar la microrred de “Fort Sill Microgrid” es un sistema diseñado y operado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos en Oklahoma [8]. La microrred está compuesta por dos generadores de 240 kW de gas natural, un inversor de 500 kVA, un arreglo de baterías ion-litio de 400 kW (56 kW-h), un interruptor estático de 1200 A en 480 V, 20 kW de paneles fotovoltaicos, una pequeña máquina eólica de 2.5 kW y cargas locales. Las cargas están compuestas por un motor de inducción de 360 HP con un arrancador estrella-delta, un motor de 200 HP con un variador de frecuencia, pequeños motores de inducción y cargas de alumbrado. El Departamento de Defensa de Estados Unidos está interesado en el desarrollo de microredes para mejorar la seguridad en el suministro de energía, reducir costos e incrementar el uso de energías renovables. La Figura 1.1 muestra el diagrama unifilar de la microrred de Fort Sill. Tiene un sistema de control comercial tipo isócrono para las funciones de control, monitoreo y visualización de variables eléctricas, también fue adaptado para incorporar el inversor del sistema de almacenamiento. Un controlador tipo isócrono también está instalado en cada generador, estos se comunican vía una red dual redundante de comunicaciones tipo ethernet, se conecta con una interface para el control de los niveles de carga del variador de frecuencia del motor y para el motor de 360 kW, y para momentáneamente inhibir el arranque de los motores si es necesario.

Es de interés las formas de operación de la microrred “Fort SILL”, especialmente cuando su operación es en forma de isla, ya que puede operar intencionalmente en isla o en respuesta a un disturbio en la red de distribución. En modo “isla intencional”, los generadores alimentan toda la carga de la microrred. Cuando la corriente que circula por el interruptor estático está cerca de cero, el interruptor es abierto en transición suave, es decir, sin tensión y frecuencia transitoria. En modo de operación “isla no intencional”, los generadores están fuera de línea, la carga es alimentada por el inversor después que el interruptor estático abre. Cuando se presenta una falla en la red o algún otro tipo de perturbación, el interruptor estático abre repentinamente, en este caso la carga de la microrred debe ser soportada por el inversor. El inversor está siempre en línea y listo para tomar la carga instalada, y se considera en este modo que existe suficiente potencia en el banco de baterías para alimentar la carga. Posterior a la apertura del interruptor estático, el inversor soporta la carga hasta que los generadores arrancan, los generadores se sincronizan con la referencia de tensión y frecuencia del inversor y toman toda la carga, si existe suficiente capacidad, el inversor puede iniciar la recarga del sistema de almacenamiento. Los sistemas de control isócronos permiten varios modos de operación conectados con la red, permite que el sistema reduzca la compra de energía durante las

horas pico de demanda, y también permite importar o exportar energía a la red de distribución.

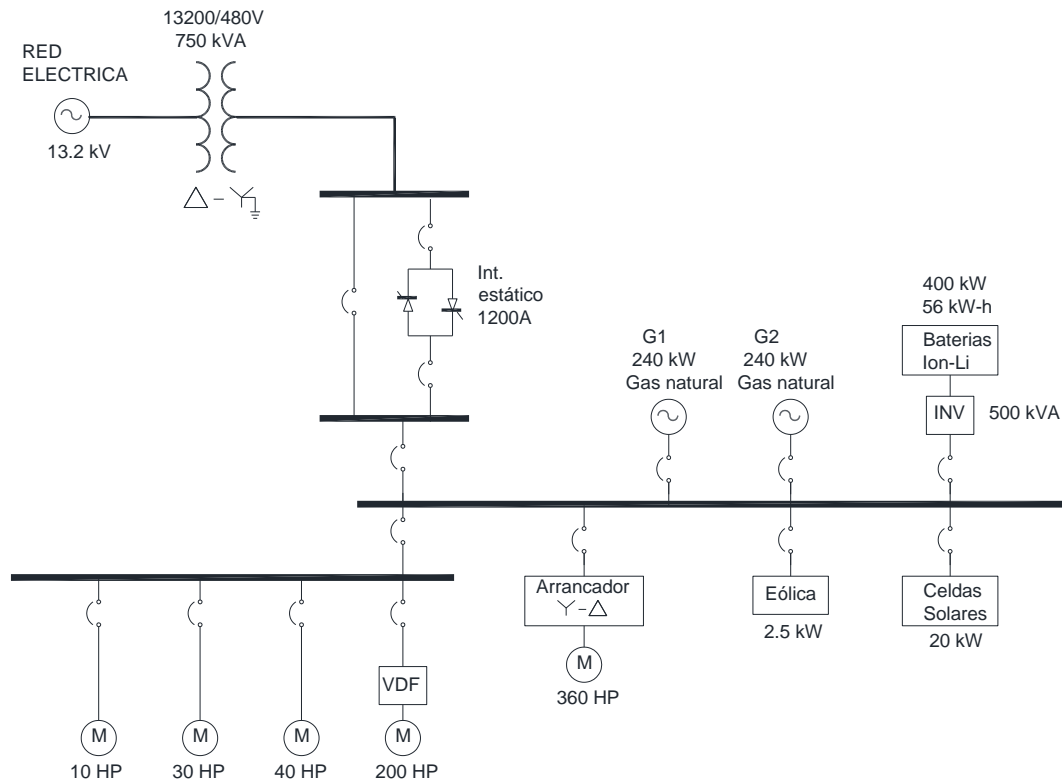


Figura 1.1 Diagrama unifilar de la microrred Fort Sill [8].

En México es todavía incipiente la creación de microrredes, sin embargo, existen centros de educación superior y de investigación que han integrado pequeñas microrredes de CD para propósitos de estudios e investigación [9-12].

En la referencia [9] diseñaron e implementaron una microrred en CD, 1 kW de potencia, un bus de 190 VCD, y con pruebas satisfactorias de operación interconectada con una referencia de red eléctrica de CA a través de un convertidor bidireccional CD/CA y también fue evaluada su operación en isla. En las pruebas experimentales utilizaron cargas resistivas y cargas no lineales como luminarias fluorescentes y tipo led, y equipo de cómputo.

Por otra parte, en [10], desarrollaron una microrred de CD de 10 kW con fuentes fotovoltaicas como generación distribuida, con buses de 380, 190 y 48 VCD, tiene un sistema de almacenamiento con baterías y una interconexión a una red eléctrica convencional de CA; integra convertidores de potencia y cargas como computadoras, luminarias tipo LED y aire acondicionado, entre otras. El sistema integra el monitoreo de

variables y la administración de energía. El proyecto de investigación definido como un laboratorio de microrred real experimental de CD, permite probar convertidores de potencia, técnicas de control, elementos de comunicaciones, adicionalmente se utiliza para la formación de recursos humanos a nivel licenciatura y posgrado.

De la misma forma en [11], desarrollaron un proyecto de microrred compuesto por sistemas de generación fotovoltaica de 44 kW, un electrolizador alcalino de 26 kW, una celda de combustible de 7.5 kW a 24 VCD y una fuente de respaldo con un supercapacitor, integrados en un bus de CD. En el diseño utilizaron redes neuronales artificiales para la predicción de la generación fotovoltaica y la producción de hidrógeno, para la generación fotovoltaica utilizaron como fuente de entrada las variables de irradiación solar de una estación meteorológica, el cual permitió aproximar a los valores reales de la generación y para la obtención de las curvas corriente-tensión de los paneles fotovoltaicos, así como para la producción de hidrógeno.

Finalmente, en [12], los autores presentan un esquema de control óptimo y robusto aplicado a una microrred de CD, es aplicado en el sistema de control de los convertidores de potencia que se utilizan en microrredes de CD. En particular el enfoque del seguimiento de la trayectoria en el control de los convertidores de potencia es muy importante para la compensación/reducción de armónicos, para la corrección del factor de potencia y restauración de la tensión/corriente sinusoidal, y donde la calidad de la potencia requiere ser mejorada.

## **1.2. Planteamiento del problema**

La *Ley de Transición Energética* [13] (LTE publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015), indica en la sección “**Del Programa de Redes Eléctricas Inteligentes**”, en el artículo 38, inciso III: **El desarrollo e integración de proyectos de generación distribuida, incluidos los de generación a partir de Energías Renovables.** El texto de esta ley externa la necesidad de desarrollar proyectos de generación distribuida, y dependiendo del sitio de localización se puede utilizar alguna tecnología primaria, es decir sol, viento, agua, o gas metano controlado que se produce a través de la descomposición de la basura. La relevancia de este artículo es el sustento legal para la sociedad en general para desarrollar proyectos de microrredes, integrando generación distribuida, para incrementar el uso de fuentes de energía renovables en pequeña escala y que coadyuven

para el aprovechamiento de los diversos tipos de recursos energéticos en las diferentes áreas productivas del país, tanto en el área urbana como en el área rural.

Por otra parte, el impacto del desarrollo de esta tesis en México, es exponer criterios y lineamientos para incrementar la información técnica existente, para que la Sociedad Mexicana incremente el desarrollo de este tipo de proyectos, aprovechando el espacio legal y para hacer frente a la reducción de emisiones contaminantes que se presentan con los combustibles fósiles.

Por otra parte, México ha firmado el acuerdo de París de cambio climático que implican compromisos para cumplir metas específicas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y México se comprometió que el 35% de la energía generada para 2024, y el 43% para 2030 sería limpia.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

Desarrollar un modelo de una microrred eléctrica con capacidad para aprovechar los recursos energéticos de un sitio en particular, y que pueda interconectarse a una red de distribución.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

Los objetivos específicos son los siguientes:

- a) Conocer las principales características de las microrredes eléctricas, las cuales integran generación distribuida, cargas e interconexión con una red de distribución.
- b) Establecer un modelo analítico para realizar análisis y estudios eléctricos (flujos de carga, corto circuito, calidad de la potencia en diferentes escenarios de operación).
- c) Analizar y evaluar los efectos eléctricos, así como el comportamiento por la operación normal (interacción con cargas lineales y no lineales).
- d) Evaluar las ventajas y desventajas de la interconexión con una red de distribución.

#### **1.4. Justificación**

El desarrollo de la tesis, proporcionará información técnica para la planeación y operación de microrredes, se obtendrán datos técnicos de corrientes, tensiones, potencias (kW, kVAr) y calidad de potencia del sistema de distribución, estos resultados permitirán conocer el comportamiento eléctrico de estos nuevos sistemas eléctricos de distribución. Los diferentes escenarios de operación de la microrred presentan parámetros eléctricos que ayudarán a conocer el comportamiento operativo de las microredes, el conocimiento de estos parámetros eléctricos complementará la información existente en México y ayudará en cierta medida a la creación de microredes.

#### **1.5. Beneficios.**

El desarrollo de microredes en México, traerá los siguientes beneficios:

##### **1.5.1 Beneficios para la compañía eléctrica:**

- a) Disminuir la inversión en la construcción de plantas de generación y redes de distribución.
- b) Control de regulación de tensión en la red de distribución.
- c) Cumplir con los acuerdos del cambio climático por la reducción de emisiones contaminantes.

##### **1.5.2 Beneficios para los usuarios:**

- a) Incremento de la confiabilidad.
- b) Mejora la calidad de la energía.
- c) Disminución de la factura de la energía.

##### **1.5.3 Beneficios para el ambiente:**

- a) Mayor aprovechamiento de los recursos renovables.
- b) Disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>.



### **1.6. Metodología para el desarrollo del proyecto**

La metodología utilizada en la realización de este proyecto, parte del análisis de datos eléctricos experimentales, que permiten, por ejemplo, que un sistema de distribución que integra cargas se modifique para integrar generación distribuida. El análisis se realiza desde cero, es decir, integrando generación distribuida, cargas y un sistema de distribución interconectado a una red de distribución. Por otra parte, los recursos energéticos del sitio definen las tecnologías de los equipos de generación, la capacidad de estos equipos depende de la demanda de las cargas y principalmente del financiamiento, el cual indicará si la microrred se construya totalmente o se realice por etapas.

Adicionalmente, mediante la observación sistemática o estructurada, se inicia definiendo aspectos concretos o conductas, por ejemplo, el flujo de potencia que circula por los equipos del sistema de distribución, desde los pequeños sistemas de generación hasta las cargas, y teniendo mayor énfasis en los flujos que circulan por el punto de interconexión con la red de distribución.

### **1.7. Alcances del proyecto de tesis**

- a) Conocer el marco normativo en el entorno internacional de las microrredes, describir algunos ejemplos de desarrollo de estos sistemas en México que todavía es incipiente, así como en otros países donde este tipo de tecnologías es ya madura, definir las condiciones de la legislación para desarrollar estos sistemas.
- b) Definir la topología de una microrred básica con su red de distribución, el cual integrará generación distribuida, las cargas y la interconexión a una RGD de 23 kV.
- c) Definir las características de la subestación de interconexión con la red de distribución de CFE.
- d) Realizar y analizar los resultados de estudios eléctricos de flujos de carga, corto circuito, y calidad de la potencia con diferentes escenarios de operación.
- e) Describir las conclusiones del presente trabajo, establecer los trabajos futuros y puntualizar las necesidades existentes en México para desarrollar las microrredes; esto permitirá a los diferentes sectores de la sociedad aprovechar el marco jurídico para invertir en recursos energéticos renovables en pequeña escala.

## **CAPÍTULO II**

### **TOPOLOGÍA DE LA MICRORRED.**

---

En este capítulo se aborda el tema de la regulación, esto es el marco normativo que los países deben integrar en su legislación para la integración de microrredes, se describe un elemento básico que son los controladores para la administración del sistema de distribución, se describe el concepto de la topología de una microrred y sus características, y la descripción de los elementos eléctricos que integran una microrred.

## **2.1 Definiciones.**

**Microrred.** Con base en CIGRE [1-3], las microrredes son sistemas de distribución de electricidad que contienen cargas y fuentes de generación distribuida (tales como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento, o cargas controlables), que pueden ser operados de una manera controlada y coordinada, mientras esté conectado a la red principal de energía o mientras esté en modo isla. La Figura 1.1 anterior muestra un ejemplo de una microrred eléctrica.

**Resiliencia.** Capacidad de un sistema eléctrico para recuperarse después de un evento de falla; el sistema tendrá la capacidad para anticiparse, para adaptarse, para absorber y para recuperarse.

Los generadores distribuidos cubren todas las escalas posibles dentro del contexto de una microrred, estos pueden tener su fuente primaria: con combustibles fósiles o biomasa en pequeña escala (CHP Generador combinado con calor y potencia), módulos fotovoltaicos (PV), pequeñas turbinas de viento, máquinas minihidráulicas, etc.

Los dispositivos de almacenamiento incluyen todos los sistemas electromecánicos (baterías), mecánicos (volantes de inercia) y tecnologías de almacenamiento de calor [14]. Mientras que el concepto de una microrred se enfoca en el sistema de potencia, el almacenamiento térmico puede ser relevante a su operación siempre que este tipo de almacenamiento afecte el funcionamiento de la microrred. Por ejemplo, la disponibilidad de almacenamiento de calor alterará la operación de un sistema de generación CHP en la medida que las cargas eléctricas y térmicas estén desacopladas. Similarmente el enfriamiento o calentamiento de edificios alterará la forma de la carga del sistema de ventilación de la calefacción y del sistema HVAC, y por consiguiente el requerimiento para operar los sistemas de generación.

Las cargas controladas, como la iluminación con regulación o el bombeo retardado, son particularmente importantes en la operación de las microrredes. Inevitablemente en los sistemas pequeños, la variabilidad de la carga afectará más en la operación de la microrred que en los sistemas de gran escala. El corolario de esto es que el control de carga puede ser de una contribución más importante para la operación de una microrred.

Con el desarrollo de los convertidores de potencia y los controles modernos, el concepto de microrredes se desarrolló de una forma importante a nivel internacional. Estos sistemas

son pequeños, independientes y pueden operar de una manera descentralizada, utiliza ciertas características de la tecnología moderna, ya que puede integrar turbinas de gas, y viento, celdas solares, celdas de combustible, y dispositivos de almacenamiento, tiene una característica importante, esto es que la microrred se localiza de lado de un usuario o de la carga [15].

Acorde con los términos anteriores y lo establecido en el capítulo I, se definen las siguientes ventajas con el desarrollo de las microredes [15]:

- a) La flexibilidad y las características de la localización de las microredes hacen posible garantizar el suministro de energía a las cargas cuando se presentan apagones causados por accidentes en las redes de transmisión o distribución. Así mismo, se reducen las pérdidas que se podrían presentar por desastres naturales, y compensa la debilidad que se pueden presentar en la seguridad y estabilidad de las grandes redes de potencia.
- b) Pueden proveer excelente calidad de potencia, y mejorar la confiabilidad para suministrar la demanda de las cargas conectadas.
- c) Disminuyen las pérdidas que se presentan en las redes de transmisión y distribución debido a las grandes distancias que recorre la energía, esto es desde los grandes centros de generación hasta las cargas; comparado con la energía que se genera en el mismo sitio donde se ubican las cargas.
- d) Pueden utilizarse para resolver problemas de electrificación en áreas remotas, donde por cuestiones orográficas, falta de caminos, y altos costos por kilómetro de red de distribución, no es posible construir una red de distribución de CFE.

La definición de una microrred no especifica ningún tiempo para operar en modo isla, la intención es que una microrred pueda funcionar el tiempo necesario como una isla controlada, es decir controlando tensión y frecuencia a la demanda existente, el por lo que se deberán implementar los controles para la interconexión a la red principal cuando existan las condiciones operativas de tensión y frecuencia, el cual son fijadas por la red de distribución externa [16].

Los desarrollos recientes en políticas energéticas y precios han incrementado el interés en la explotación de pequeñas fuentes de generación de energía eléctrica. Esta generación en pequeña escala necesita ser conectada a sistemas de distribución de una forma simple y económicamente competitiva. Como los sistemas de distribución han sido inicialmente contruidos para entregar potencia, la interconexión de pequeños generadores requiere nuevos esquemas y nuevos métodos para operar la red de distribución. Los generadores pequeños localizados en el nivel de una red de distribución son conocidos como generación distribuida.

### ***2.2 Regulación técnica en los países.***

Para establecer la planeación y desarrollo de las microredes en los países, generalmente deben desarrollarse una serie de regulaciones y cuestiones económicas, estas deberán integrarse en el entorno técnico de las redes convencionales de tal forma que las microredes se establezcan como parte de los sistemas eléctricos de potencia. Uno de los puntos técnicos para el desarrollo de estos pequeños sistemas eléctricos, es resolver la intermitencia de los sistemas renovables; así como la dependencia del clima y la propia naturaleza de los sistemas renovables, y que estos sistemas operen en sincronismo con el sistema eléctrico de potencia. Es importante que las áreas afines en los centros de investigación, así como en las universidades de los países, estudien el entorno integral de las microredes, esto permitirá el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables de un sitio en particular, con el enfoque principal que es disminuir la dependencia de los combustibles fósiles integrados en los sistemas eléctricos de potencia.

### ***2.3 Controladores en microredes.***

Un elemento importante para la operación de una microrredes el sistema de administración de energía en microredes (MEMS, por sus siglas en inglés) [17]. El sistema integra funciones de control, las funciones de control establecen que una microrred opere como un sistema, y como una sola entidad eléctrica, de esta forma puede operar en forma autónoma o en forma conectada a una red eléctrica de distribución, y perfectamente conectarse y desconectarse de una red de distribución y alimentar cargas críticas. Los sistemas de control de los MEMS son comunes en las microredes, sin importar la topología de la

microrred y su configuración. Estos establecen los alcances de control requeridos para el operador de la red eléctrica de distribución y para la operación propia de la microrred.

El estándar IEEE 2030.7-2017 [18] describe las funciones del controlador de una microrred, éste reduce a dos estados estables (SS, por sus siglas en inglés) los modos de operación de una microrred y cuatro tipos de transiciones, como se muestra en la Figura 2.1.

- **SS1** - Modo conexión a red eléctrica (**Estado estable**).
- **SS2** - Modo Isla (**Estado estable**).
- **T1** - Transición, conexión en red eléctrica (estado estable) a Modo Isla (**planeado**)
- **T2** - Transición, conexión en red eléctrica (estado estable) a Modo Isla (**no planeado**)
- **T3** - Reconexión, modo isla (**estado estable**) a modo conexión a red eléctrica.
- **T4** - Arranque en negro de la microrred, operación en modo isla.

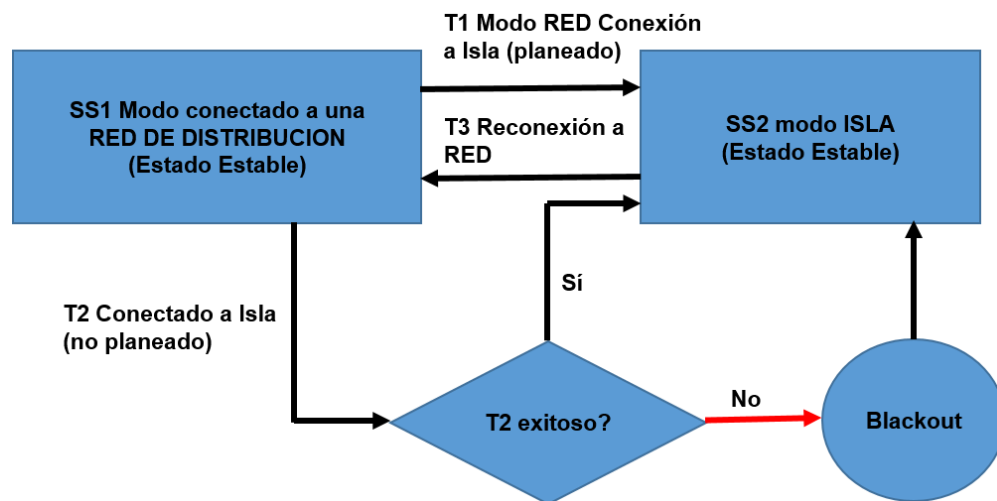


Figura 2.1 Diagrama de flujo de control simplificado de una microrred [18].

## 2.4 Topología de un Sistema Eléctrico.

La topología del sistema eléctrico de la microrred en estudio, está formada por los equipos de generación, por el sistema de distribución y por las cargas. El sistema de distribución a través de una subestación eléctrica se interconecta a una RGD. La microrred integrará dos tipos de fuentes de generación, celdas fotovoltaicas y una microturbina; las celdas fotovoltaicas a través de un inversor (CD/CA) generan en 220 V, y dependiendo del arreglo de las celdas fotovoltaicas y de la potencia total, también pueden generar a través de un inversor (CD/CA) en 480 V. La microturbina genera en sus terminales 480 V, y para conectarse a la red de distribución de 220 V se utiliza un transformador reductor con conexión estrella/estrella, de esta forma los equipos de generación están conectados a la barra de baja tensión 220 V de la subestación eléctrica. Las cargas del sistema de distribución están conectadas en dos barras de conexión de 220 V. La subestación eléctrica es de relación 23000/220 V, con capacidad de 500 kVA. El lado de 23 kV está conectado a una línea de distribución de 23 kV de la empresa eléctrica CFE [19].

La topología de la microrred eléctrica muestra los tres sistemas principales, los cuales son:

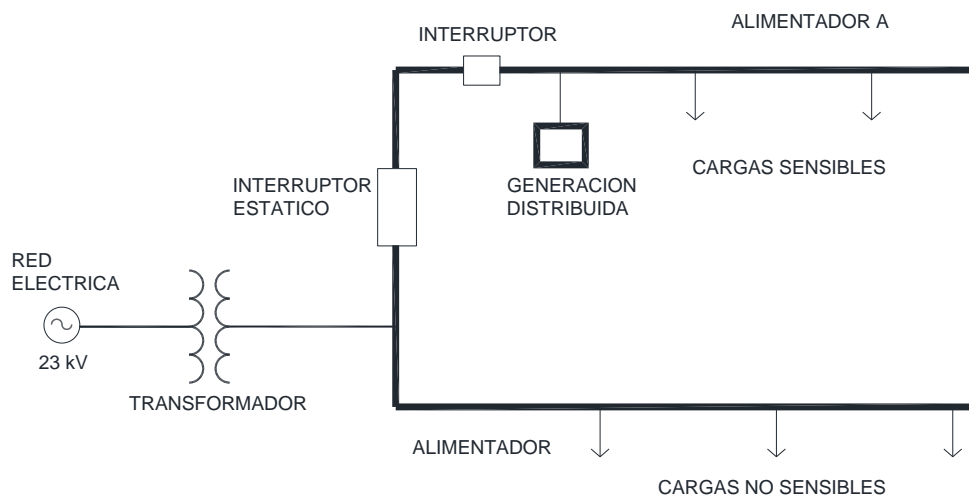
- a) Los equipos de generación.
- b) La red de distribución.
- c) Las cargas.

Sin embargo, para que estos sistemas operen correctamente se requiere de sistemas de protección, control y medición. Los sistemas de protección se utilizan en los sistemas eléctricos de distribución para proteger los equipos ante una falla, y estos aíslan la sección con falla del sistema de distribución. El sistema de control, dependiendo de las condiciones de operación en modo interconectado o aislado, define las condiciones de control, esto es que en modo interconectado mantiene las condiciones de tensión y frecuencia para sincronizar las fuentes de generación con la referencia de tensión y frecuencia de una RGD. En caso de pérdida de la referencia, esto es tensión y frecuencia de una RGD, el sistema mantiene la tensión y frecuencia para continuar su operación en forma aislada y alimentar la carga que está conectada a la red de distribución de la microrred. En esta condición, el sistema de control continúa buscando la tensión y frecuencia de la RGD para posteriormente volver a sincronizarse con la red de referencia [16].

Por otra parte, para que estos elementos se integren eléctricamente se requiere de un sistema de distribución, el cual integra la propia red de distribución formada por barras para conectar los sistemas de generación y las cargas, y por sus características de operación puede conectarse a una red de distribución pública y/o privada, o podría operar en forma

aislada. Esta característica de operación se establece siempre y cuando el sistema de generación, es decir, la energía generada kw-hora es mayor a los kw-hora de la carga, de otra manera se tendría que integrar un sistema de control que desconecte los equipos no críticos, o que algunas cargas sean desconectadas de la red de distribución.

La Figura 2.2 muestra como ejemplo una microrred básica [16], puede observarse la interconexión a una RGD a través de una subestación de interconexión, la potencia de la subestación puede definirse por la sumatoria de las cargas. El diagrama también muestra la distribución de equipos en baja tensión, el cual está formado por dos ramas. La rama superior tiene conectada las cargas sensibles y también tiene conectada la generación distribuida, esta rama está protegida con un interruptor estático. La segunda rama, en la parte inferior tiene conectada las cargas no sensibles, es decir que ante un evento (falla en la RGD) estos equipos no son esenciales para su operación. El primer criterio que se debe considerar en la definición de la topología de una microrred, es definir las cargas sensibles y las son sensibles, este primer paso es importante para establecer la potencia en la rama o ramas críticas. Dependiendo de la topología de la microrred, se definen los sistemas de control y se aprovecha mejor la potencia de la generación distribuida, principalmente cuando la microrred opera en forma aislada ante una falla en la RGD.



*Figura 2.2 Diagrama unifilar de una microrred básica.*

Posteriormente, después de definir la topología de la microrred, esta se utiliza para desarrollar las especificaciones técnicas de los equipos, y realizar los siguientes estudios



eléctricos que permite la integración técnica de una microrred. En resumen, después de definir la topología de una microrred se realiza lo siguiente:

- Especificaciones técnicas de los equipos.
- Estudios eléctricos (cortocircuito, flujos de carga).
- Análisis del comportamiento de la calidad de potencia.
- Análisis ante eventos internos y externos para definir los esquemas de protecciones.

La Figura 2.3 muestra la topología de la microrred del modelo experimental en estudio.

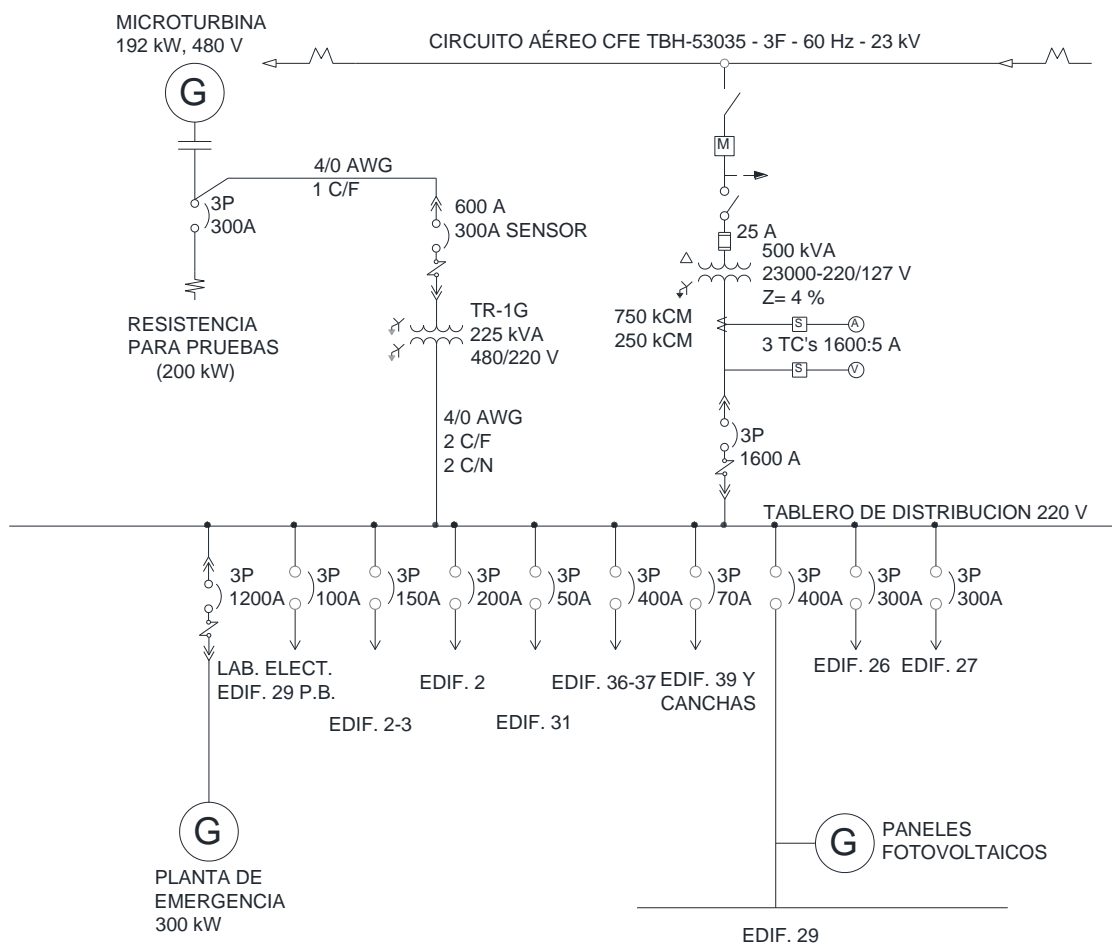


Figura 2.3 Topología del modelo experimental de la microrred

## ***2.5 Descripción de equipos que integran la microrred eléctrica.***

**Fuentes de Generación.** Las fuentes de generación de una microrred eléctrica pueden ser cualquier fuente de generación con tecnología renovable, limpia, o combustible fósil. En ocasiones, una combinación de estas tecnologías [20], definen la factibilidad técnica operativa de las microredes eléctricas. Actualmente las tecnologías de generación renovables más utilizadas en las microredes eléctricas son las celdas fotovoltaicas y pequeñas máquinas eólicas. Aunque es común encontrar celdas fotovoltaicas debido que los costos de instalación y mantenimiento son menores que las máquinas eólicas, aunado a la existencia como fuente primaria de radiación solar que existe en la gran mayoría del país, comparado con menores espacios de calidad continua de energía eólica. En este tipo de fuentes, la potencia total de generación (kW) es la suma de la potencia de todas las celdas fotovoltaicas, sin importar el arreglo serie, paralelo o mixto de las celdas. Actualmente la potencia de las celdas solares comerciales en forma unitaria, tienen un rango entre 200 y 400 W. En los últimos años la tecnología [21] ha incrementado la relación watts/m<sup>2</sup>. De forma similar se define la potencia total de fuentes de generación eólica, existen actualmente en el mercado potencias que van desde capacidades muy pequeñas de 300 W hasta 5000 W. En las microredes eléctricas se utilizan capacidades pequeñas de generación comparadas con las granjas de energía renovable de gran potencia que forman parte de las grandes redes de potencia.

Las fuentes de generación de energía limpia son principalmente máquinas mini o micro-hidráulicas, esto es máquinas de pequeña potencia, dentro de la clasificación son máquinas con una capacidad menor a 10 MW. Generalmente estas fuentes de generación no requieren de un pequeño embalse en el río, ya que estos equipos se instalan a filo de agua, es decir el agua es de paso [22].

La microrred experimental está integrada por paneles fotovoltaicos con una capacidad de 7kW, con micro inversores conectados a dos fases con la red de 220 V. Otra fuente de generación es una microturbina que funciona con biodiesel, la capacidad de diseño es 192 kW a 480 V, sin embargo, en condiciones ISO del punto de instalación considerando la altitud, la temperatura y los servicios auxiliares de la propia máquina está tiene una capacidad de 130 kW.

**Sistema de respaldo.** El sistema de respaldo de la red de distribución de baja tensión está integrada por una máquina diésel de 500 kW, a 220/127 V, estas tienen una autonomía de 72 horas, tiempo suficiente para el llenado de los tanques de almacenamiento con diésel.

**Cargas.** Las cargas de la microrred se encuentran conectadas principalmente en la subestación 2; las cargas predominantes son alumbrado fluorescente y computadoras, en pequeña cantidad hay equipos de aire acondicionado y motores de pequeña capacidad.

**Red General de Distribución.** Actualmente el punto de interconexión de la microrred a través de la subestación 2 con relación 23000/220-127 V, de 500 kVA de capacidad es a una RGD de 23 kV. En la barra de 220 v se encuentran conectadas las dos fuentes de generación y se concentra más del 60% de la carga total.

## ***2.6 Especificaciones de los equipos principales de la microrred.***

Los equipos eléctricos principales que integran la microrred, su selección y características, son los siguientes: Transformadores, seccionadores, conductores para media y baja tensión, e interruptores electromagnéticos, mismos que se describen a continuación.

### **2.6.1 Selección de los Transformadores**

La selección de los transformadores se realiza cumpliendo con las recomendaciones de las especificaciones NMX-J-116-ANCE-2005 para transformadores tipo subestación y de la norma NMX-J-351-ANCE-2005 para transformadores de distribución y potencia tipo seco.

Los transformadores de distribución son los equipos más importantes en una subestación eléctrica, deben tener la capacidad para soportar tanto las cargas que tendrán de manera permanente, como las cargas de la subestación contigua durante un intervalo de tiempo corto de ser necesario ante algún evento de falla.

#### **2.6.1.1 Selección del transformador de la SE-2.**

Para la interconexión de la microrred a la RGD de 23 kV, ya existe actualmente un transformador de 500 kVA instalado en la SE-3, sus características son:

#### 1. Características Generales

Se utilizará un transformador de distribución con enfriamiento en aceite, actualmente está instalado en la SE-2 del INEEL, actualmente el transformador cumple con las características de la demanda instalada (160 kW), suma de las cargas principales de los edificios 26, 27 y 29.

#### 2. Características particulares (aplicación) que debe cumplir el transformador.

- Capacidad, 500 kVA.
- Relación de transformación, 23000/220-127V.
- Conexión, Delta/Estrella aterrizada (sistema sólidamente aterrizado). La conexión de la terminal de la estrella será a la red de tierras de la subestación.
- Impedancia, 4% como impedancia mínima de cortocircuito de acuerdo a la Norma Internacional IEC 60076-5.
- Aislamiento, aceite.
- No. de Taps, 5, en pasos de 2.5%, con referencia al nominal, dos arriba, dos abajo, y un central.
- Ambiente, intemperie con NEMA TIPO 3R.
- Aislamiento clase 25kV (para el lado de 23,000 kV), y 1.2kV (para el lado de 220-127).
- Frecuencia, 60Hz.
- Temperatura ambiente, 30°C.
- Altitud, 1500 m.

Con base en el diagrama unifilar, la SE-2 tendrá un transformador con capacidad de 500 kVA, el criterio para determinar esta capacidad es con la base que en caso de falla de un transformador de una subestación contigua, el transformador de la subestación cercana pueda alimentar las cargas del transformador fallado.

#### **2.6.1.2 Transformador de la Microturbina.**

## 1. Características Generales

Se selecciona un transformador de distribución tipo seco debido a su tamaño reducido, que no requiere mantenimiento continuo y puede ser instalado en exteriores sin preparación para en caso de derrame del aceite por algún incendio.

## 2. Características particulares

- Capacidad 225 kVA.
- Relación de transformación, 480/220-127V.
- Conexión, Estrella/Estrella aterrizada (sistema sólidamente aterrizado).
- Impedancia, 4% como impedancia mínima de cortocircuito de acuerdo a la Norma Internacional IEC 60076-5.
- Devanados Al/Al
- Aislamiento, seco.<sup>1</sup>
- No. de Taps, 5, en pasos de 2.5%, con referencia al nominal, dos arriba, dos abajo, y un central.
- Ambiente, Intemperie con NEMA TIPO 3R.
- Aislamiento clase 1.2kV (tanto del lado del primario como en el secundario.)
- Frecuencia, 60Hz.
- Temperatura ambiente, 30°C.
- Altitud, 1500 m.

**Nota 1. Se considera un transformador tipo seco para el manejo de las diferentes tecnologías de construcción de transformadores de distribución.**

### 2.6.2 Selección de los Seccionadores

Los seccionadores son dispositivos mecánicos que se instalan en las redes de distribución de energía eléctrica, sobre todo subterráneas, cuya función es ofrecer protección a estas redes y permitir su operación en caso de ser necesario.

La importancia de los seccionadores en las redes de distribución de energía eléctrica, ya sean públicas o privadas, es fundamental para el buen funcionamiento de estas, para la seguridad de la red y para las labores de reparación, revisión y mantenimiento de las instalaciones.

## 1. Características Generales.

Las especificaciones del seccionador se basan en la especificación CFE VM000-51 para seccionadores tipo Pedestal para redes subterráneas.

## 2. Características particulares del Seccionador S-1.

- Tensión de diseño para el nivel básico de aislamiento 27kV.
- Medio aislante Gas SF<sub>6</sub>
- Número de vías del anillo principal, 2
- Capacidad de las vías del anillo principal: 200 A.
- Medio de interrupción en las vías del anillo principal: Gas SF<sub>6</sub>
- Con sistema de telecontrol.
- Con transferencia automática.
- Número de vías del lado de derivación a la carga: 1
- Capacidad de las vías del lado de derivación a la carga: 200 A.
- Medio de interrupción en las vías de derivación a la carga: Gas SF<sub>6</sub>.
- 1 Frente.
- Protección contra humedad.
- Temperatura ambiente promedio 30°C.
- Con sistema de telecontrol.
- Con transferencia automática
- Número de vías del lado de derivación a la carga: 2
- Capacidad de las vías del lado de derivación a la carga: 200 A.
- Medio de interrupción en las vías de derivación a la carga: Gas SF<sub>6</sub>.
- 1 Frente.
- Protección contra humedad.
- Temperatura ambiente promedio 30°C.

### 2.6.3 Selección de los conductores de Media Tensión

Para la aplicación de la microrred del lado de Media Tensión se utilizará cables de potencia monopolares de aluminio con temperatura de operación de hasta 90°C y con aislamiento de polietileno de cadena cruzada (XLP) con un nivel de aislamiento de 100% para 25kV.

A continuación, se describe el método utilizado para el cálculo de los conductores tanto para el alimentador de la Subestación 1 como para el anillo de Media Tensión que rodea la microrred.

#### 1. Cálculo del alimentador del Transformador de la Subestación 1 (SE-1).

Para este cálculo se considera transformador funcionando a su máxima capacidad debido a las situaciones que se pueden presentar durante las cuales este se puede encontrar suministrando a las cargas de la subestación contigua.

Potencia aparente: 500KVA

Longitud: 15m.

$$\text{Corriente Nominal: } \frac{500 \text{ kVA} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 23000 \text{ V}} = 12.55 \text{ A}$$

De acuerdo con la norma de referencia NRF-024-CFE la sección transversal mínima para conductores en relación con la Tensión debe ser de 53.5 mm<sup>2</sup> como mínimo para una tensión nominal entre fases de 25 kV, lo que es equivalente a un conductor de 1/0 en AWG.

Factor de corrección de Temperatura ambiente para una temperatura de 30°C en base a la Tabla 310-60(c)(4) y para conductores con temperatura de 90°C: 1.10

El conductor equivalente al 1/0 AWG para Media Tensión con las características ya mencionadas que se canalizará a través de ductos subterráneos tiene una ampacidad permisible de 155 A.

Al aplicar el Factor de corrección de temperatura da una ampacidad permisible de:

$$155 \quad \times \quad 1.10 \quad = \quad 170.5 \text{ A}$$

Por lo tanto, es viable la utilización del conductor de **1/0 AWG** para alimentar al transformador de la Subestación 1 por el lado de Media Tensión.

#### 2. Cálculo de los conductores del anillo de media Tensión.

Para el caso del anillo de Media Tensión los conductores deben de ser capaces de conducir la corriente generada por la operación de las 4 subestaciones, del laboratorio de Equipos de Pruebas y del Edificio 15. Para este cálculo se considera la suma de los transformadores de cada subestación trabajando a su máxima capacidad y también que será una red subterránea la que se tenga.

Capacidad Total: 2255 KVA

$$\text{Corriente Nominal: } \frac{2255 \text{ kVA} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 23000 \text{ V}} = 56.6 \text{ A}$$

Factor de carga: 100%

Considerando los siguientes datos para la red subterránea:

Temperatura ambiente del terreno: 25°C.

Resistividad térmica del terreno: 120°C·cm/W.

Cables enterrados en ductos subterráneos y un solo conductor por ducto.

Profundidad de los conductores: 1.0m

Tensión: 23,000V.

Se opta por utilizar conductores de tamaño **1/0 AWG** para media Tensión con capacidad de conducción de hasta 155A

Por lo tanto, es viable la utilización del conductor de **1/0 AWG** para alimentar al anillo principal de Media Tensión de la microrred.

#### **2.6.4 Selección de los conductores de Baja Tensión.**

Se utilizarán cables THHW-LS de cobre con temperatura máxima operacional de 90°C con material aislante Termoplástico resistente a la humedad, al calor, a la propagación de incendio, de baja emisión de humos y de gas ácido. Para baja tensión, de hasta 600V.



A continuación, se realiza el cálculo del alimentador de la SE-1 siguiendo el mismo procedimiento para el cálculo de los demás alimentadores y circuitos de la microrred que se encuentren en Baja Tensión.

Cálculo del alimentador Subestación 1 (SE-1).

Potencia Aparente: 500KVA.

Longitud del alimentador: 15m.

$V_{f-f}$ : 220V

Factor de demanda: Para el caso de cada subestación se considera un factor de demanda del 100% debido a que en caso de requerirlo cada subestación tendrá que respaldar las cargas de la subestación contigua.

$$\text{Corriente Nominal: } \frac{500 \text{ KVA} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 220\text{V}} = 1312.16\text{A}$$

$$\text{Corriente de carga continua: } = 1312.16 \cdot 1.25 = 1640.2 \text{ A}$$

Factor de Temperatura (Tabla 310-15(b)(2)(a) de la NOM-001-SEDE-2012): 1.0

Factor de Agrupamiento (Tabla 310-15(b)(3)(a) de la NOM-001-SEDE-2012): 1.0

$$\text{Corriente Corregida: } \frac{1640.2}{1.0 \cdot 1.0} = 1640.2\text{A}$$

Conductor por ampacidad en base a la tabla 310-15(b)(16) de la NOM-001-SEDE-2012: **500 KCM 4C/F y 4C/N** (Los conductores 500 KCM son capaces de conducir hasta 430 A, por lo tanto, al utilizar 4 conductores en paralelo es posible conducir hasta 1720 A).

$$\text{Caída de Tensión: } e\% = \frac{2\sqrt{3}(L)(I)}{(V_{f-f})(S)} \quad e\% = \frac{2\sqrt{3}(15\text{m})(1312.16 \text{ A})}{(220)(253 \cdot 4)} = 0.31\%$$

Donde:

L= Longitud del conductor

I= Corriente Nominal

$V_{f-f}$ = Tensión de Fase a Fase

S= Sección Transversal

Por lo tanto, los conductores si cumplen en cuanto al requerimiento de caída de tensión de que no sobrepase el 2%.

**Protección:**

1 Interruptor electromagnético de Potencia de bajo voltaje de 1600 A, basado en microprocesador; con nueve valores de protección de fase y corriente de falla a tierra para la formación de curvas de disparo y coordinación de unidades múltiples; protección de falla a tierra y medición de corriente de fase, de neutro y de falla a tierra visibles en un display LCD.

**TUBERIA**

Área de los conductores por tubería.

$$4C\ 500\ KCM = 4 \times 509.7\ mm^2 = 2038.8\ mm^2$$

$$\mathbf{\acute{A}REA\ TOTAL = 2038.8\ mm^2}$$

3 tuberías de tubo conduit pared gruesa de 3 1/2" con un 40% de sección transversal de 2584 mm<sup>2</sup> cada uno. En cada canalización se colocarán 4 cables conductores, uno por cada fase y el neutro.

## **CAPÍTULO III.**

### **ESTUDIOS ELÉCTRICOS. Análisis del comportamiento de la microrred**

---

En este capítulo se realizan estudios eléctricos para una cierta topología de microrred con un software comercial, los estudios son: flujos de potencia, cortocircuito y calidad de potencia, considerando que estos estudios eléctricos son la base para la planeación de una microrred. También estos estudios se utilizan para analizar crecimientos en la generación, en las cargas; para analizar calidad de potencia cuando se incorporan cargas no lineales considerables las cuales pueden modificar la onda senoidal de corriente. Estos estudios eléctricos que se presentan, también se puede aprovechar para conocer el comportamiento de la red de distribución cuando en algunos segmentos de la red de distribución se realizan mantenimientos. Se analiza el comportamiento de la generación distribuida, la carga, la red de distribución y la interconexión con la RGD.

### **3.1 Introducción**

El uso de tecnologías como los analizadores de redes se han utilizado en las últimas décadas, existen diferentes marcas en el mercado y han sido utilizadas en todo el mundo por ingenieros para la planeación de redes eléctricas tradicionales [23-25].

Con el desarrollo de microredes los fabricantes de software han desarrollado nuevas herramientas para el análisis de pequeños sistemas, han desarrollado nuevos modelos para la integración de fuentes renovables como paneles fotovoltaicos, microturbinas, máquinas eólicas, así como herramientas para simular la operación de inversores, controladores de carga, y sistemas de almacenamiento. Diversos análisis se han realizado en diferentes publicaciones, en [26] se analiza una microrred de 23 MW utilizando flujos de potencia óptimos, utilizan máquinas eléctricas de generación con biogás. Por otra parte, en [27] se analiza una microrred integrado por máquinas diésel con una capacidad de 24.6 MW, utilizan flujos de potencia para el análisis del sistema eléctrico, las máquinas generan en 6.9 kV. En [28] realizan un análisis muy completo de diferentes técnicas de optimización computacional que se aplican con diversas herramientas de software para la planeación de microredes. En este artículo se propone el uso de una herramienta computacional para la planeación de pequeñas microredes, considerando pequeños sistemas de generación, comparado con las grandes potencias indicado en [26-28].

En [29] se enfatiza que cada vez es necesario utilizar herramientas de análisis por la integración de sistemas eléctricos más complejos, y adicionalmente por sistemas eléctricos inteligentes como las microredes. Adicionalmente, se analiza una microrred con integración de generación renovable operando en modo isla e interconectado a una red de distribución. Con base en un modelo base de una microrred se realizan estudios de flujos de carga principalmente para conocer las tensiones en las barras, los flujos de carga en los enlaces, independientemente del análisis de cortocircuito y armónicos.

En [30] se muestra principalmente el análisis de flujos de potencia para un sistema eléctrico tradicional integrado por una subestación de 132/11 kV, con 143 MVA de transformación. Utilizando la herramienta ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), se analizan escenarios de operación que reflejan baja tensión en algunos buses de carga, integran compensación para mejorar normativamente la tensión en los buses y adicionalmente mejoran el factor de potencia.

En [31] se analiza una microrred con las herramientas de ETAP, considerando que la microrred es un sistema eléctrico con una estructura diferente, sus autores analizan el

comportamiento ante fallas externas al PCC punto de interconexión, y analizan las ventajas de integrar almacenamiento de energía en una microrred para el soporte de tensión y frecuencia, y de esta forma mantener la confiabilidad del sistema eléctrico.

En [32] analizan la integración de generación distribuida para formar una microrred, y se analiza con mayor énfasis la operación de ésta en modo isla, además la disminución de la potencia de salida de la generación distribuida y su impacto en la tensión en un bus con una carga de gran capacidad. Esta capacidad de análisis es necesario realizar para conocer con que equipos es posible soportar la tensión para que esas grandes cargas no se desconecten en condiciones de operación en isla, considerando que los inversores de sistemas fotovoltaicos pueden disminuir sus condiciones nominales al variar la irradiancia en los sistemas fotovoltaicos.

En [33] el autor analiza con flujos de potencia una microrred integrada con fuentes de generación renovable, adicionalmente utiliza el módulo de estabilidad transitoria de ETAP para analizar la microrred propuesta. En general recomienda la utilización de las herramientas computacionales para realizar análisis de sistemas eléctricos, ya que se pueden realizar un sin número de simulaciones con todas las modificaciones a la topología de la microrred, tanto a la generación, cargas y al sistema de distribución.

Después de un análisis realizado en diferentes artículos afines y referentes a estudios eléctricos en microredes, se propone que en la etapa de planeación la utilización de una herramienta de análisis de redes eléctricas, la cual tiene ventajas muy importantes.

En este capítulo se analiza una microrred eléctrica considerando equipos de generación fotovoltaica; en el análisis se utiliza el Analizador de Redes Eléctricas ETAP, versión 19.0.0T [34], con sus diversos programas, utilerías y base de datos. Los objetivos de este capítulo son los siguientes:

- 1) Establecer en forma general el proceso natural para integrar una microrred eléctrica utilizando un software comercial.
- 2) Analizar los resultados y el comportamiento de los parámetros eléctricos de una microrred.

Los equipos que integran la microrred son sistemas fotovoltaicos como elementos principales de generación, un sistema de distribución interconectado a una Red general de

Distribución de 23 kV (RGD), una subestación de distribución que se interconecta a la red de distribución del distribuidor y una red de distribución en 220 V que recolecta la generación fotovoltaica, un banco de capacitores de 50 kVAr, dos cargas inductivas, una de 10 kW y otra de 50 kW.

El analizador de redes ayudará a realizar los estudios eléctricos como flujos de potencia, cortocircuito, y flujos armónicos que permitan analizar la viabilidad de la integración de cada uno de los componentes eléctricos, además de tener los elementos técnicos para definir y verificar los parámetros eléctricos de los equipos que integran una microrred eléctrica. Los equipos y sus características, como la potencia e impedancia de un transformador de distribución que forman parte de una subestación eléctrica para la interconexión con un alimentador de CFE son analizados, además de los cables, protecciones, y los equipos de generación. Por otra parte, se revisarán datos y consideraciones del Código de RED de México, se revisará el factor de potencia, y la calidad de la potencia eléctrica en el punto de interconexión con la RGD.

La Figura 3.1 muestra el diagrama unifilar de la microrred eléctrica que se analiza.

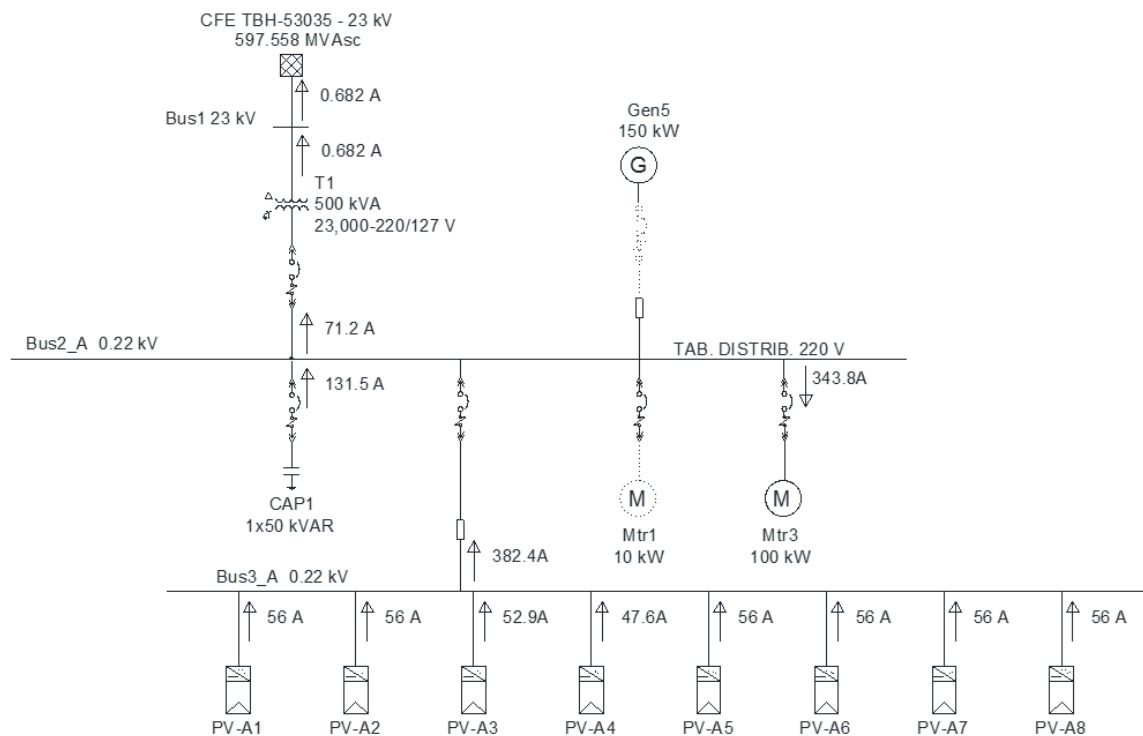


Figura 3.1 Diagrama unifilar de la microrred eléctrica 150 kW

### **3.2 Descripción de la microrred en estudio**

El diagrama unifilar de la Figura 3.1 muestra en la parte superior lado izquierdo el punto de interconexión con una RGD de 23 kV de CFE, el punto de interconexión se define con la barra etiqueta Bus1 23 kV. Hacia el interior se encuentra la subestación de relación 23000/220-127 V, capacidad del transformador de distribución 500 kVA, conexión delta-estrella aterrizada. La relación 220/127 V del transformador permite en la red de distribución de baja tensión conectar diversos tipos de cargas. Este sistema de distribución en baja se define 3 F, 4 H. Esta característica permite alimentar una combinación de cargas trifásicas, cargas de dos fases, y cargas monofásicas. La conexión a la barra de 220 V del tablero de distribución es con un interruptor electromagnético de estado sólido de 1600 A, capacidad adecuada para conducir la corriente con el 100% de la carga del transformador.

En la barra bus2\_A de 220 V están conectadas las cargas base de la microrred en estudio, 10 y 50 kW, sin embargo, cada una de ellas son modificadas para ejemplificar cada uno de los escenarios de operación y conocer el comportamiento de cada uno de los parámetros eléctricos que demuestren que todo el sistema eléctrico opera correctamente y finalmente que es factible integrar una microrred eléctrica. En la misma barra de 220 V está conectado un banco de capacitores de 50 kVAr para corregir el factor de potencia de la carga. Esta potencia es modificada en los diversos escenarios para compensar el factor de potencia de la carga, y las ventajas de los sistemas de distribución como microredes que pueden contribuir por ejemplo a disminuir el flujo de potencia reactiva en las RGD. En la barra bus2-A está conectado un alimentador en 220 V hacia la barra bus3\_A con un cable de 600 V y un interruptor electromagnético, se utiliza para recoger la generación eléctrica de los paneles fotovoltaicos, en promedio la generación de los paneles fotovoltaicos son 150 kW.

También en el bus principal de baja tensión bus2\_A está conectado un generador síncrono de pequeña capacidad 150 kW.

### **3.3 Escenarios de operación**

Para conocer el comportamiento de cada uno de los parámetros eléctricos de la microrred se analizan los siguientes escenarios de operación. Para cada uno de estos escenarios se

obtienen datos eléctricos como valores de cortocircuito, valores de flujos de potencia y calidad de la potencia, estos son analizados y permiten establecer las tendencias de operación de una microrred. Con base en esta referencia, se modifican los parámetros de generación fotovoltaica, la variación de las cargas, la compensación reactiva, el comportamiento de la red y la generación síncrona con combustibles fósiles.

#### **Escenarios de operación:**

- a) Generación fotovoltaica (variable).
- b) Carga variable.
- c) Compensación de potencia reactiva (kVAr).
- d) Parámetros de la red de distribución (variables).
- e) Generación síncrona (conectada, desconectada)

### **3.4 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO CON ESTUDIOS ELECTRICOS DE LA MICRORRED ELECTRICA.**

#### **3.4.1 Estudios de corto circuito**

El estudio de cortocircuito de una microrred eléctrica calcula las corrientes de una falla trifásica, monofásica y cualquier combinación de fases a tierra, en las barras del sistema de distribución [35-36]. Los programas de redes eléctricas calculan las contribuciones de corriente de los generadores, motores, y se suman a la contribución de la red de distribución. El analizador de redes que se utiliza para realizar este estudio cumple con los estándares ANSI/IEEE de la serie 37 y con los estándares IEC serie 60909.

##### **a) Falla trifásica**

La Figura 3.2 muestra los valores de corriente para una falla trifásica en las barras, se indican los valores de la corriente para cada uno de las barras, generalmente los valores de corriente se muestran en kilo-Amperes (kA), e indican que estos valores de corriente circularán por el sistema de distribución de la microrred hasta que los equipos de protección desconecten la sección fallada. Los valores de corriente de falla trifásica son generalmente mayores que los valores de falla monofásica, e indica que se deben instalar equipos de





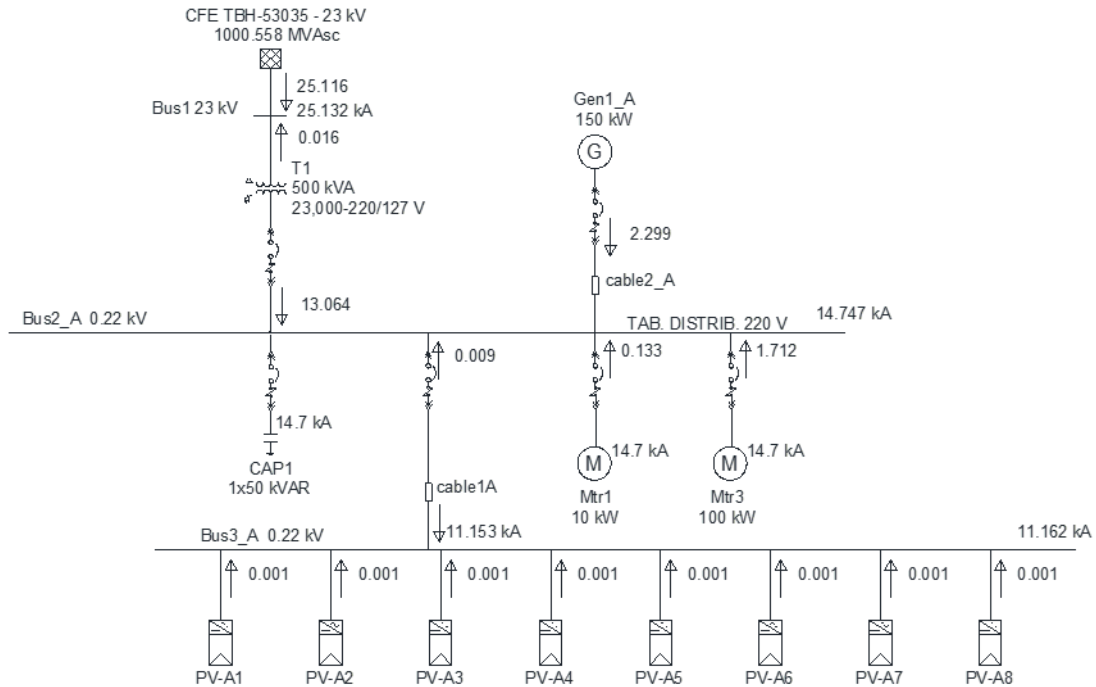


Figura 3.3 Valores de falla trifásica de la microrred 150 kW (impedancia del T1 modificada)

La figura 3.3 muestra los valores de falla trifásica en las barras de 220 V y 23 kV con la impedancia del transformador T1 modificada a  $z=10\%$ . Los valores de falla que se muestran en la Figura 3.3 anterior utilizan una  $z=4.5\%$ , valor típico para transformadores de distribución de esta capacidad.

Se observa que la contribución de falla por parte de la RGD es la misma 25.116 kA, y tanto el generador 1\_A y los motores Mtr1 y Mtr3 también son las mismas. El efecto de incrementar la impedancia en el transformador T1 de 4.5 a 10% modifica considerablemente el valor de falla trifásica en las barras aguas abajo. Por lo que al incrementarse la impedancia en el transformador se incrementa la impedancia total del circuito por lo que disminuye la corriente de falla de 28.876 kA a 13.064 kA [35-36].

También se observa que el valor de falla trifásica disminuye en la barra bus3\_A de 18.331 a 11.153 kA.

Por otra parte, las contribuciones del generador 1\_A y las corrientes de los motores Mtr1 y Mtr3, incrementan el valor de falla de la aportación de la RGD de 13.064 kA a 14.747 kA.

En ambas corridas de cortocircuito se observa que la aportación de los sistemas fotovoltaicos al valor de falla trifásica es 0.009 kA, este valor es muy despreciable comparado con el valor de falla trifásica que aporta el generador 1\_A 2.299 kA.

Generalmente en los sistemas de generación renovables que se interconectan con una RGD a través de inversores, el valor de contribución a la falla trifásica es despreciable comparado con el valor de falla que aportan los sistemas de generación convencionales. Esta característica de baja aportación por estos sistemas, ayuda a las Redes Generales de Distribución, porque no se incrementa el valor de falla en el punto de interconexión y como consecuencia a lo largo del alimentador. Sin embargo, esta característica de baja corriente, evita que los sistemas de protección por sobrecorriente convencionales no se apliquen para proteger estos sistemas de distribución [35].

### **b) Falla monofásica**

La Figura 3.4 muestra los resultados del cortocircuito de una fase a tierra en las barras bus2\_A y bus3\_A, también se observa la contribución de la red externa de CFE que son 12.553 kA. El valor de falla monofásica en el bus2\_A es 29.6 kA y la tensión disminuye a 127 V, es por esta razón los interruptores deben operar rápidamente para desconectar la sección del sistema de distribución con falla [35].

Los valores de falla monofásica disminuyen cuando la falla en un sistema de distribución se localiza aguas abajo; por ejemplo, si se compara el valor de falla monofásica del bus3\_A que está aguas abajo con un valor de 15.318 kA. Este valor es mucho menor que el valor de falla que se presenta en el bus2\_A aguas arriba, indica que la falla recorre mayor distancia y como consecuencia se incrementa la impedancia del circuito disminuyendo la corriente en el punto.

En la misma Figura 3.4 se observa en el bus3\_A la contribución a la falla de cortocircuito monofásico por los inversores, el valor es prácticamente cero, esta característica es típica para sistemas de generación renovable con conexión a la red a través de inversores. La Figura 3.3 anterior muestra la aportación de los inversores al bus3\_A, se observa un pequeño valor de aportación de 0.001 kA [29].

La Figura 3.5 muestra los valores de falla monofásica en las mismas barras bus2\_A y bus3\_A, para este análisis fue modificado la impedancia del transformador T1 de 500 kVA, de 4.5% a 9%. La contribución por parte de la red de distribución de 23 kV no se modifica, sin embargo, el incremento de impedancia al doble en el transformador T1 modifica completamente el valor de falla monofásica en el bus2\_A, se reduce de 29.601 a 15.156

kA, por la misma consecuencia también se reduce el valor de falla aguas abajo en el bus3\_A, de 15.318 a 9.921 kA.

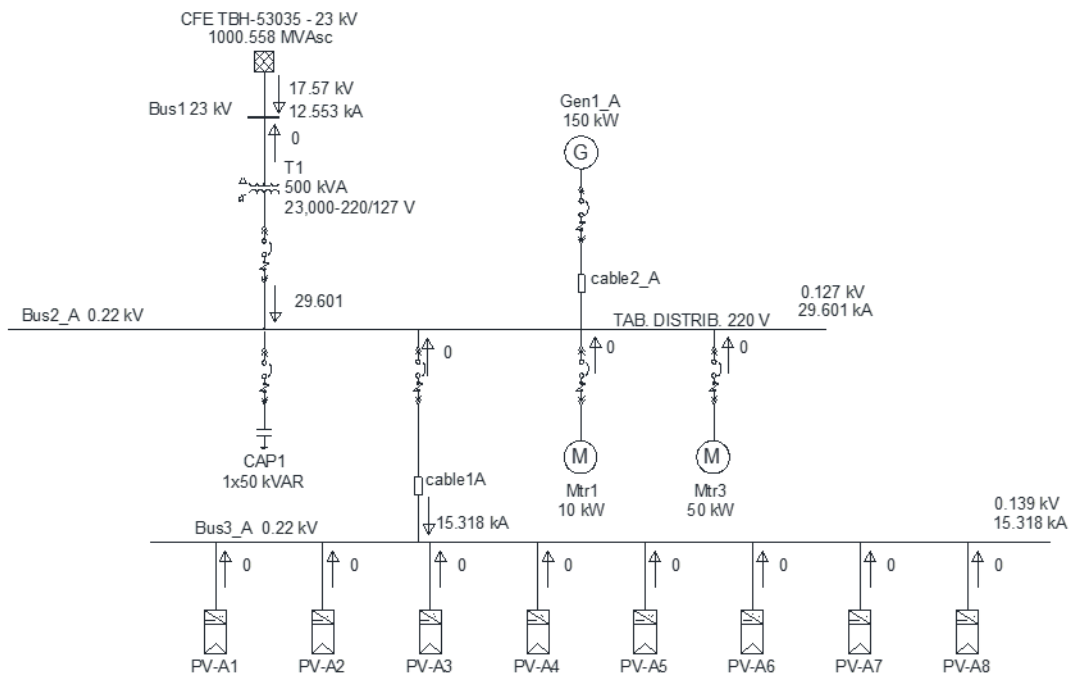


Figura 3.4 Valores de falla monofásica de la microrred eléctrica 150 kW

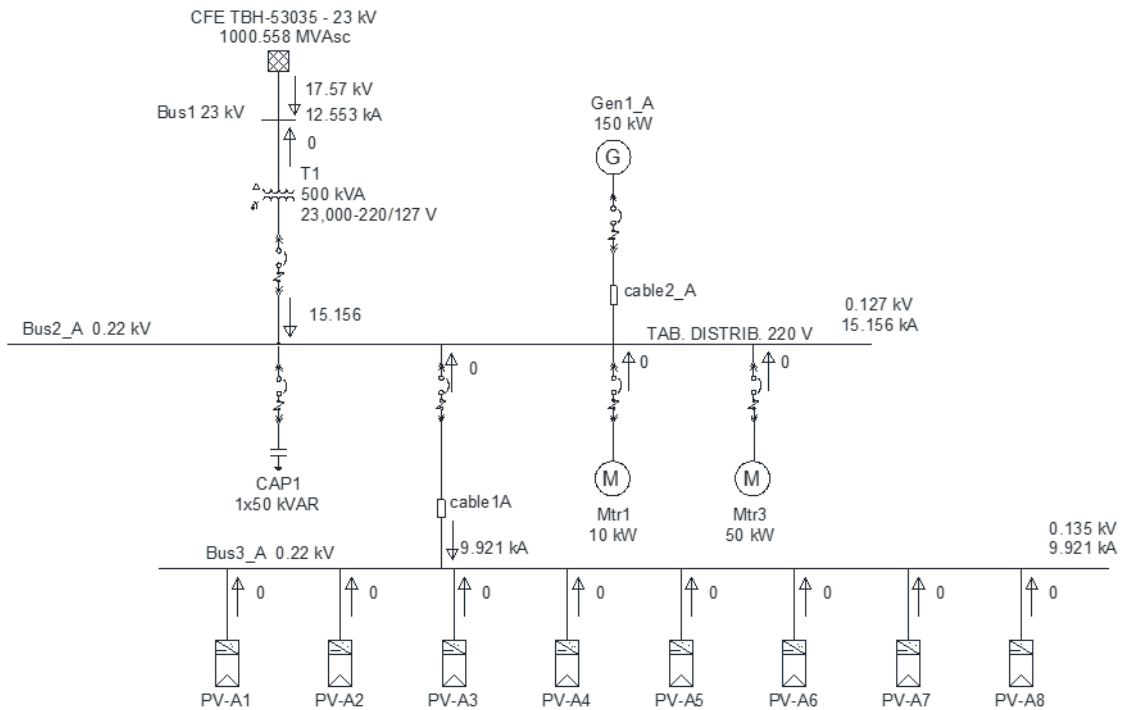


Figura 3.5 Valores de falla monofásica de la microrred eléctrica 150 kW (impedancia modificada de 4.5 a 9%)

### 3.4.2 Estudios de flujos de potencia

El estudio de flujos de potencia calcula las tensiones en todas las barras o buses, y los flujos de potencia (kW, kVAr) magnitud y ángulo de fase en los circuitos derivados, alimentadores, enlaces, y puntos de interconexión [37-38]. En el proceso de diseño de una microrred eléctrica este estudio es muy importante, se analizan los diferentes escenarios que deben reflejar las diversas condiciones de operación en forma interconectada. Este estudio es muy importante en la planeación de una microrred [38], con las diversas corridas con los diversos escenarios permite analizar las capacidades de cada uno de los elementos que integran el sistema de distribución de una microrred eléctrica.

#### a) Escenario base:

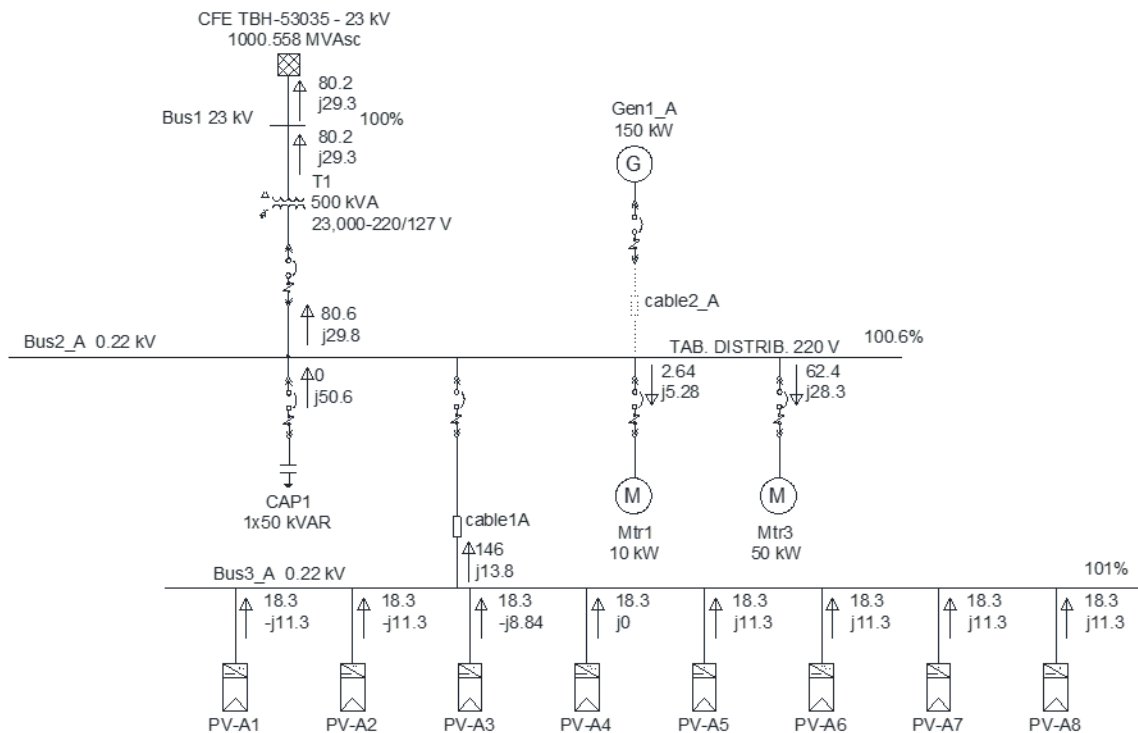


Figura 3.6 Resultados de flujos de potencia de una microrred eléctrica 150 kW

Datos iniciales del escenario base:

<b>Generación paneles solares</b>	8 x 20 kW = 160 kW
<b>Generación microturbina</b>	150 kW
<b>Cargas</b>	60 kW
<b>Banco de capacitores</b>	50 kVAr (10% de la potencia base del transformador)
<b>Subestación de interconexión</b>	500 kVA
<b>Tensión de interconexión</b>	23 kV
<b>Potencia de cortocircuito 23 kV</b>	1000 MVA

### **Interpretación básica.**

La Figura 3.6 muestra los resultados de flujos de potencia en un diagrama unifilar de la microrred. Los valores de potencia, tanto activa (kW) como potencia reactiva (kVAr) se generan en los paneles fotovoltaicos, circulan por los cables y por las barras para alimentar y mover a los equipos motrices. El banco de capacitores de 50 kVAr es una fuente de potencia reactiva fija, complementa la potencia reactiva que se requiere para los equipos motrices. Las potencias (kW y kVAr) generadas en la microrred abastecen los equipos motrices, la diferencia o excedentes de ambas potencias circulan a la red de distribución de CFE.

### **Análisis:**

Se observan el porcentaje de tensión en las barras de 220 V y 23 kV; los valores son 100% en la barra de 23 kV, en las barras de 220 V barra2\_A 100.1%, y barra3\_A 100.5 %; cada una de las tensiones se encuentran dentro del rango permitido por la normatividad [39].

Los flujos de potencia real y reactiva se muestran en cada uno de los circuitos derivados y enlaces. El panel fotovoltaico "PV-A1" genera 18.3 kW y 11.3 kVAr, el grupo de paneles fotovoltaicos generan el total de la potencia renovable, la potencia circula por el enlace de 220 V entre las barras bus2\_A y barra3\_A, circulan 146 kW y 13.8 kVAr. Parte de esta potencia se consume en las dos cargas localizadas en el bus2\_A de 220 V, las cargas suman 60 kW, y consumen 65.04 kW, y 33.58 kVAr.

Con respecto a la potencia real, se observa que se generan 146 kW por el sistema de generación fotovoltaica, se consumen en el bus principal de 220 V, 65.04 kW con las dos cargas, la diferencia de estas potencias 80.6 kW circula por la subestación hacia la interconexión, por las pérdidas del sistema de distribución este valor es diferente.

Realmente la microrred tiene una aportación de 80.2 kW y 29.3 kVAr al alimentador de 23 kV a través del punto de interconexión; el sentido de la flecha hacia arriba y los valores positivos indican que la microrred tiene una aportación a la red general de distribución [38]. La potencia tanto kW como kVAr que circulan hacia la red de distribución de 23 kV, es la potencia que dejan de generar las centrales eléctricas que se encuentran localizadas a muchos kilómetros de la microrred, esta potencia al no viajar por la red de transmisión ni por las redes de distribución permite disminuir pérdidas en los conductores y equipos de transformación, incrementando la eficiencia del sistema eléctrico en su conjunto.

En forma similar, se observa que se generan 13.8 kVAr de potencia reactiva por los paneles fotovoltaicos, circulando por el enlace hacia la barra principal bus2\_A de 220 V. Toda la potencia reactiva se consume en las dos cargas que suman 33.58 kVAr. Sin embargo, en la misma barra principal está conectada una fuente de potencia reactiva formado por un banco de capacitores que generan 50.6 kVAr. Este equipo compensa la potencia reactiva que requieren estas dos cargas. Debido que se genera más potencia reactiva en la microrred eléctrica con la integración de los capacitores, la diferencia 29.8 kVAr circulan hacia la subestación es decir aguas arriba y hacia el alimentador de 23 kV; por las pérdidas de la red de distribución de la microrred circulan 29.3 kVAr [37-38].

La Figura 3.7 es el mismo diagrama que el indicado en la Figura 3.6 muestra la potencia aparente y el factor de potencia en los circuitos derivados y enlaces. Los parámetros de flujos de potencia se han elegido en el software que muestre la potencia en kVA's y el factor de potencia. En la interconexión de la microrred con la red de distribución de 23 kV "Bus1" se observa que el factor de potencia es adelantado +93.93%.

Esta característica de factor de potencia adelantado, es un valor típico para sistemas de distribución donde la potencia reactiva generada por la microrred es mayor a la potencia reactiva consumida por la carga.

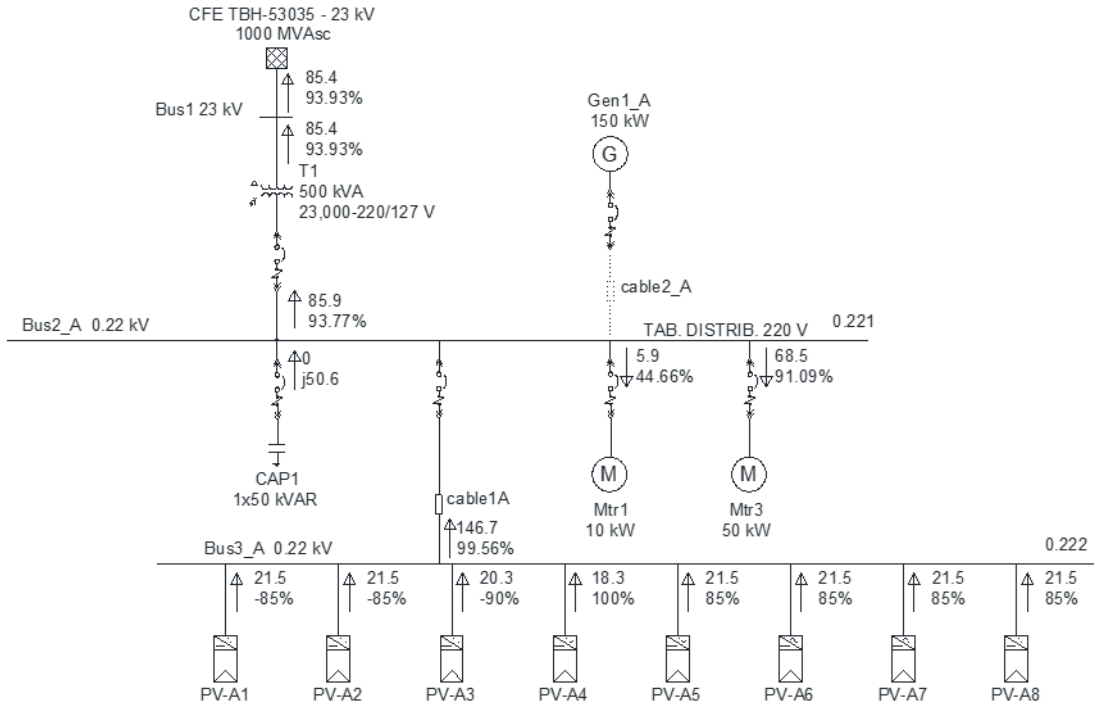


Figura 3.7 Resultados de flujos de potencia de una microrred eléctrica 150 kW

**Caso base 1:**

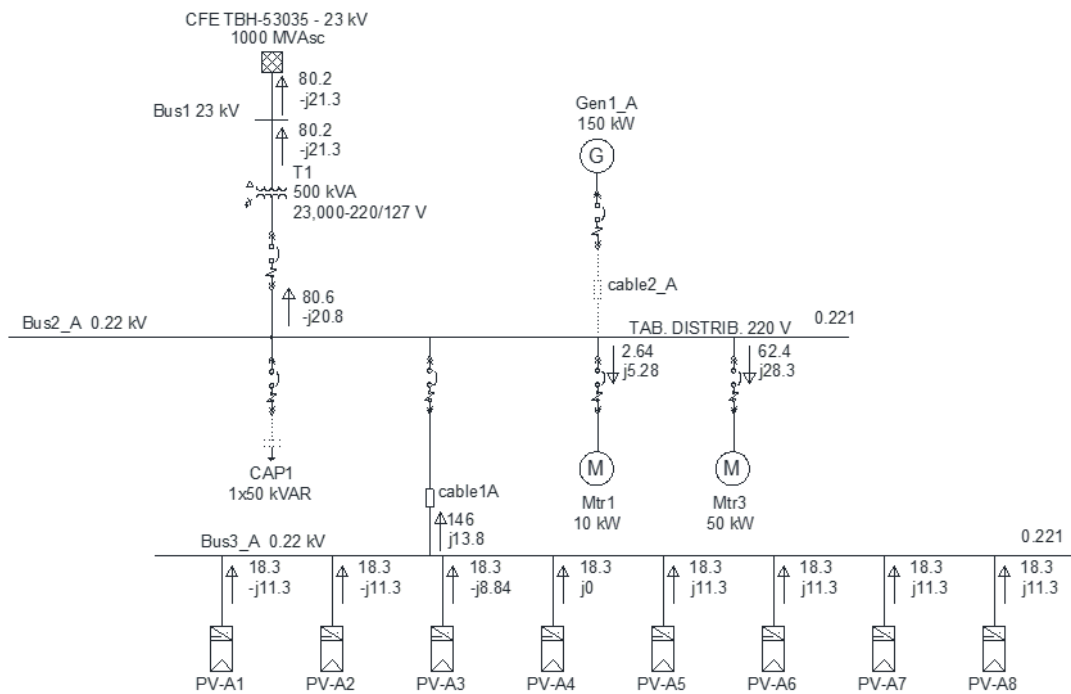


Figura 3.8 Resultados de estudios de flujos de carga de una microrred eléctrica 150 kW. **Caso base 1**



## **Análisis:**

La Figura 3.8 muestra el caso base 1, presenta una variante básica en los sistemas de distribución, se desconecta el capacitor de 50 kVAr, se obtienen los siguientes resultados.

Los resultados de potencia real en la microrred son similares al escenario base, esto es porque las condiciones de operación de los paneles fotovoltaicos no son modificadas. Los flujos de potencia real kW son los mismos en los diagramas.

En este caso, se observa que se mantiene la generación de 13.8 kVAr de potencia reactiva por los paneles fotovoltaicos. Circulan por el enlace 1 hacia la barra principal de 220 V bus2\_A, toda la potencia reactiva se consume en las dos cargas que suman 33.58 kVAr. Sin embargo, en la misma barra principal está desconectada la fuente de potencia reactiva formado por un banco de capacitores de 50 kVAr. Este equipo ya no compensa la potencia reactiva que requieren estas dos cargas. La diferencia de estas dos potencias es 20.8 kVAr. La potencia reactiva de las dos cargas es mayor a la potencia reactiva generada por los paneles fotovoltaicos. Para la operación de las cargas inductivas en la barra principal de 220 V se requiere que la RGD de 23 kV aporte esta diferencia de potencia reactiva.

Por las pérdidas de la red de distribución de la microrred circulan de la red externa a la microrred 21.3 kVAr. Este caso base 1 resume que la potencia reactiva puede generarse en las barras para consumirse por las cargas, de lo contrario las fuentes de generación a grandes distancias deben generarlas a un costo mayor.

La Figura 3.9 es el mismo diagrama que el indicado en la Figura 3.8 muestra la potencia aparente, la corriente y el factor de potencia en los circuitos derivados y enlaces. En la interconexión de la microrred con la red de distribución de 23 kV "Bus1" se indica que el factor de potencia atrasado es 96.65%.

Esta característica de factor de potencia atrasado -96.65 es un valor común de factor de potencia para sistemas de distribución donde la potencia reactiva generada por la microrred es menor a la potencia reactiva consumida por la carga. Esta condición indica que existe un flujo de potencia reactiva hacia el interior de la microrred para compensar lo generado en el interior, a pesar que la generación de potencia real dentro de la microrred es mayor a la potencia consumida por la carga. Esta característica es atípica ya que no se comporta el sistema de distribución como un centro de carga convencional. Esta particularidad es la diferencia entre una generación distribuida y una microrred eléctrica, aún con las mismas características de potencia de generación.

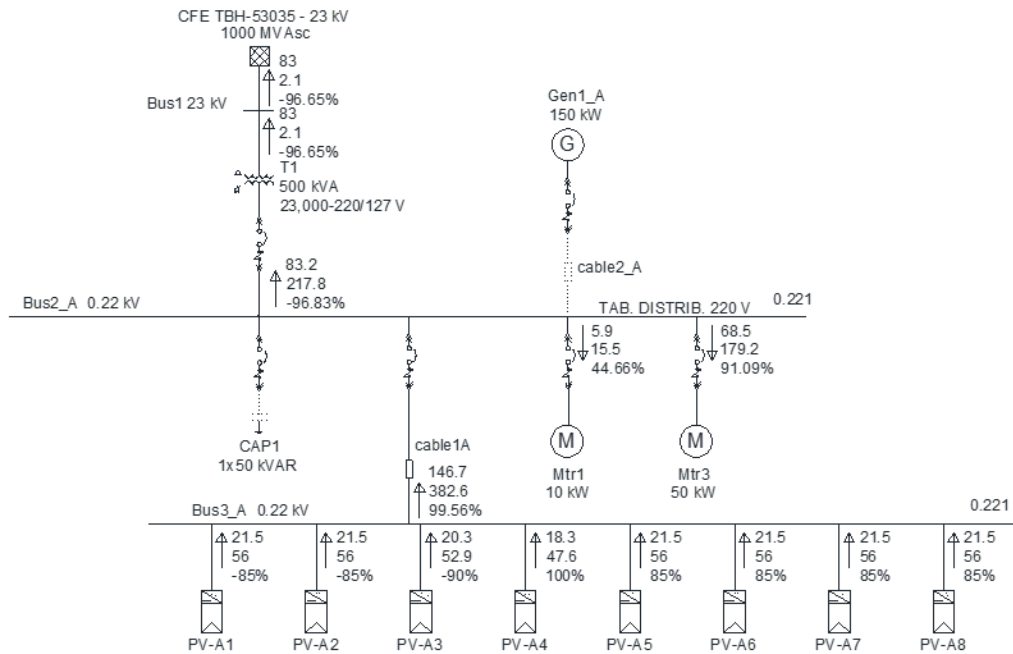


Figura 3.9 Resultados de estudios de flujos de carga de una microrred eléctrica 150 kW. **Caso base 1**

En la planeación y diseño de microrredes eléctricas es importante el apoyo de algún software que permita analizar capacidades de los equipos y la forma en la que operará el sistema. Se pueden tomar consideraciones a tiempo que permitan la viabilidad técnica de una microrred eléctrica.

### 3.4.3 ESTUDIOS CALIDAD DE POTENCIA

Los estudios de calidad de la potencia en una microrred definen si las formas de ondas de tensión y/o corriente del sistema de distribución han sido modificados. Las formas de ondas son modificadas en el sistema de distribución en la medida que se conecten equipos y aparatos con componentes electrónicos y controladores digitales que los modifiquen, como variadores de velocidad, fuentes interrumpibles, convertidores de potencia, rectificadores, lámparas de LED's, inversores, entre otros dispositivos. La Figura 3.10 muestra el diagrama unifilar con THD's en las barras y enlaces; se observan valores de cero, solo la barra

bus2\_A tiene un valor de THD=0.01, sin embargo, este valor es insignificante. Indica que no existen dispositivos que modifiquen las ondas de tensión y/o corriente. En resumen, no existen equipos en la microrred que modifiquen las ondas de tensión y/o corriente.

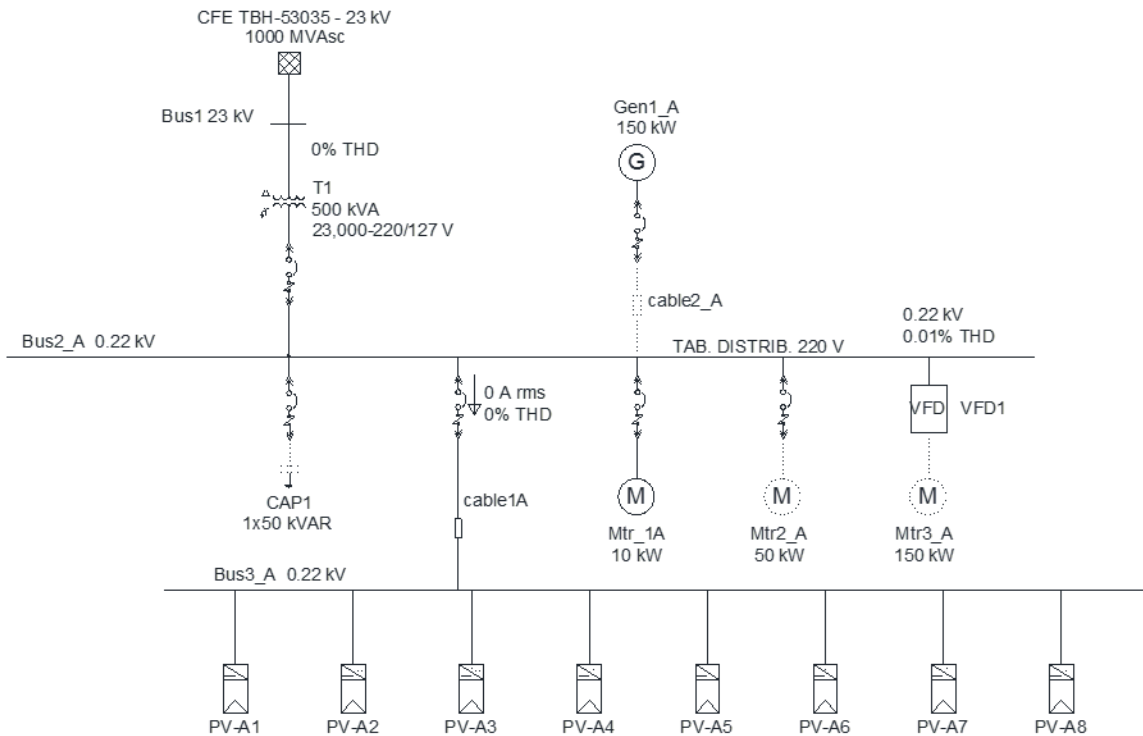


Figura 3.10 Diagrama unifilar con THD's en barras y enlaces

Para analizar un caso con armónicos se modificó el archivo del diagrama unifilar de la Figura 3.10, se conectó el motor Mtr3\_A de 150 HP el cual tiene un arrancador con variador de frecuencia de 150 HP. La Figura 3.11 muestra las características de las formas de onda de tensión y/o corriente en las barras y enlaces. Se observa que se presenta un THD=10.47 en la barra de 220 V, bus2\_A. Las Figuras 3.12 y 3.13 muestran la forma de onda y el espectro de frecuencias de la calidad de energía en el bus2\_A, se observa que la onda de tensión es modificada por las características de diseño y operación del variador de frecuencia del motor Mtr3\_A.

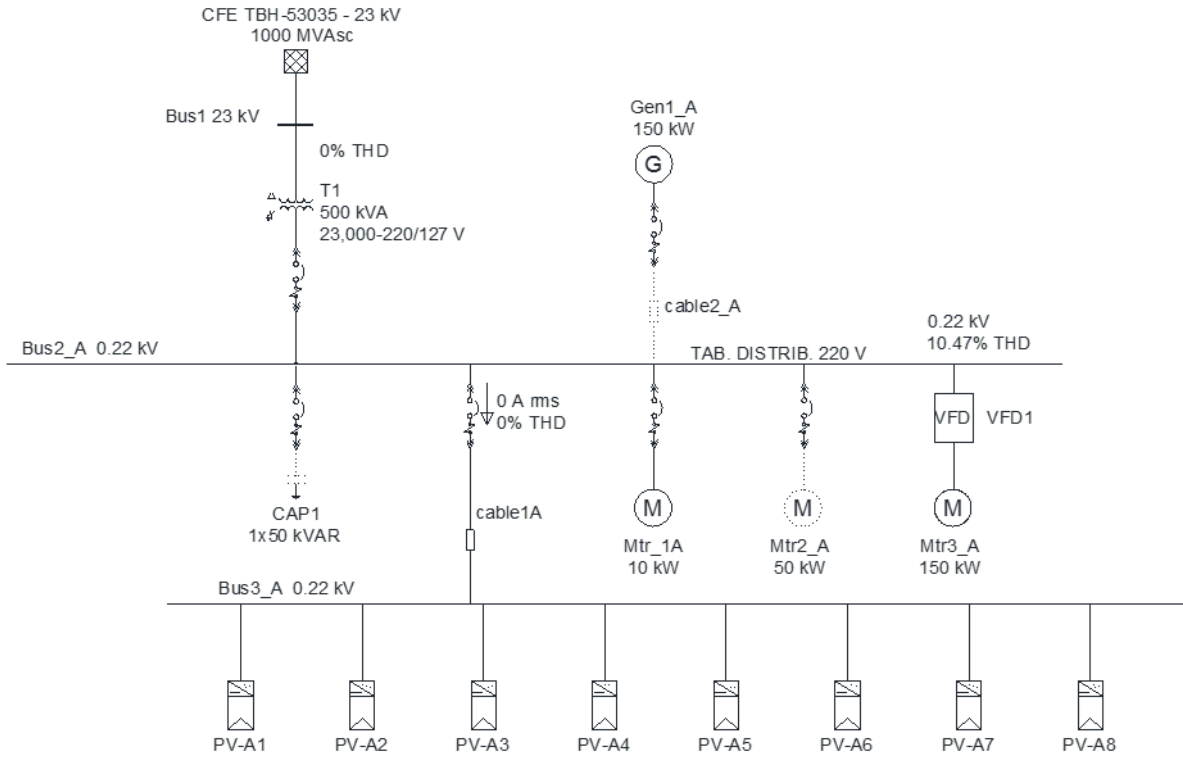


Figura 3.11 Diagrama unifilar con THD's en barras y enlaces

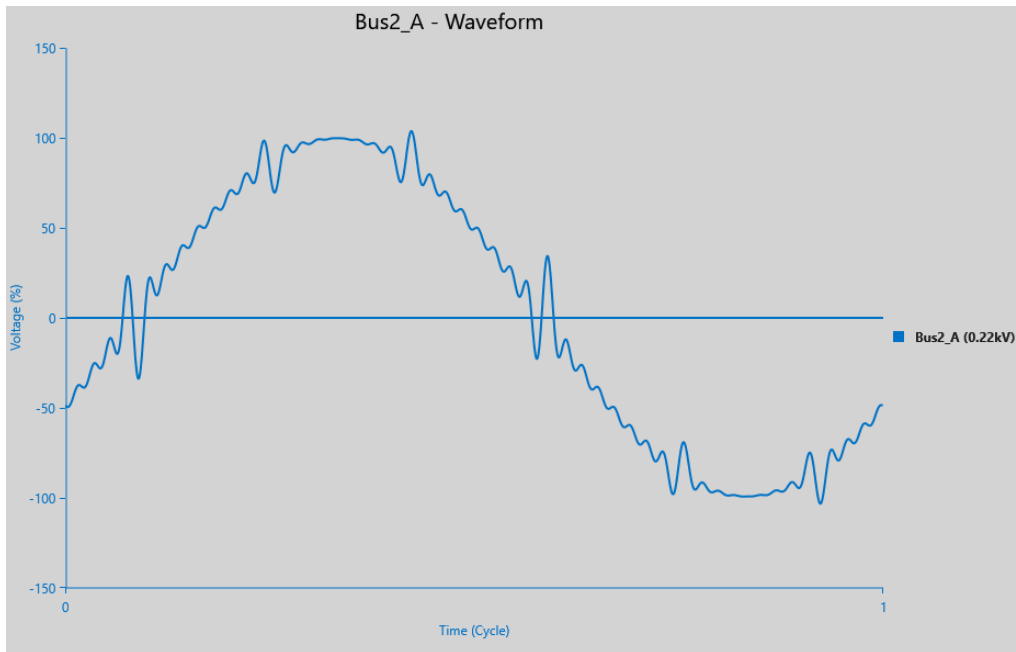


Figura 3.12 Forma de onda de tensión en el bus2\_A

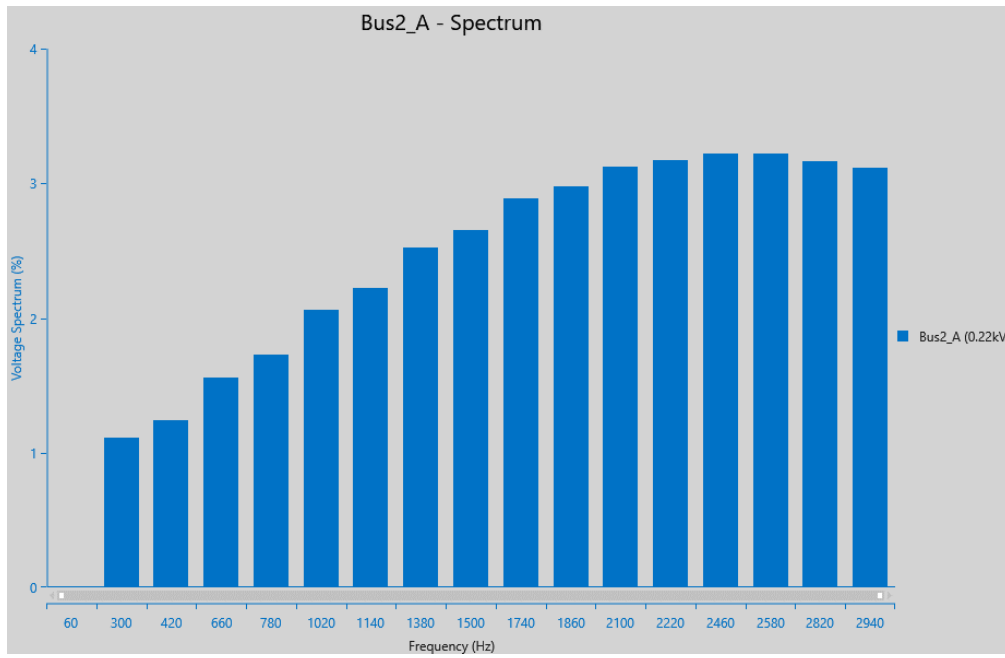


Figura 3.13 Espectro de frecuencias en el bus2\_A

## **CAPÍTULO IV.**

### **ANÁLISIS DEL MODELO DE UNA MICRORRED DE 150 kW**

---

En este capítulo se analiza un modelo de una microrred de 150 kW con la herramienta Matlab, el modelo utiliza paneles solares como equipos de generación de energía, adicionalmente el modelo está interconectado a una red de distribución. Para analizar el comportamiento del modelo se utilizan equipos y dispositivos prediseñados en Simulink, se integran cargas, y los convertidores electrónicos para acoplar la generación de CD de los paneles solares para ser acoplados a la red de CA de referencia con la RGD.

## **4.1    Introducción**

En este capítulo se analiza un modelo de una microrred considerando equipos de generación fotovoltaica, en el modelado se utiliza Matlab con la herramienta Simulink. En el modelo se utilizan parámetros de temperatura y radiación. También se considera una condición de carga constante, así como los mismos parámetros de la red eléctrica de distribución descritos en el capítulo anterior. El procedimiento considera en detalle la generación fotovoltaica ya que en el sitio de referencia de la microrred física solo existe energía solar como fuente primaria para la generación de energía eléctrica. Se describen los pasos para la construcción del modelo físico utilizando bloques predefinidos de la herramienta de software para la integración de los elementos eléctricos de una microrred. De esta forma se integran fuentes de generación fotovoltaica, transformadores de distribución, la red de distribución, cables, interruptores, cargas (kW y kVAr), una red general de distribución, y los inversores. Este modelo físico puede ser utilizado como base para desarrollar otras microredes, para conocer el comportamiento de los flujos de carga, y cómo se comporta un sistema operando en modo interconectado o en modo aislado de la red de distribución. Los análisis presentados permitirán tener los elementos básicos para interpretar los resultados de modelos y simulaciones de sistemas similares, finalmente se analizarán los resultados obtenidos.

## **4.2    Antecedentes**

En los últimos años las fuentes de energía como la solar y el viento están siendo utilizadas para la generación de energía eléctrica. Actualmente la energía solar es una de las energías que a través de las celdas fotovoltaicas ha crecido enormemente a nivel mundial [40]. A pesar que se han desarrollado diversas tecnologías para la construcción de paneles solares, estos todavía tienen una baja eficiencia, entre 12 y 20% [41]. Sin embargo, estos equipos de generación tienen gran ventaja sobre otros sistemas de generación distribuida ya que en la instalación y mantenimiento estos presentan menores costos comparados con otros sistemas [42]. Por las características de la ubicación a nivel mundial México tiene una gran capacidad energética para integrar microredes con esta tecnología de generación [Anexo 1].

Con el desarrollo de nuevas tecnologías, el costo de las celdas fotovoltaicas ha disminuido en forma importante, en los últimos años estos costos se han reducido 16.95% [40]. La celda fotovoltaica es el dispositivo básico, estas pueden agruparse para formar un panel solar, la integración de paneles solares en arreglos serie-paralelo forman en conjunto un arreglo y/o arreglos que pueden ser desde unos cuantos kilowatts hasta megawatts (plantas solares). La potencia de cada uno de estos arreglos también define la potencia del inversor, cuyas características permiten interconectarse a una red eléctrica o para operar en forma aislada.

El desarrollo de un modelo matemático de una microrred eléctrica es muy indispensable ya que permite contar con una herramienta para validar un sistema físico [43]. La integración de los diferentes equipos y sistemas eléctricos, así como su sintonización, permitirá predecir el comportamiento de la microrred en modo interconectado o en modo en isla. Cuando se utilizan diferentes mediciones y parámetros de un sistema físico bajo diferentes condiciones de operación en el modelo matemático, éste se define con mayor precisión, esto es hacer más semejante el modelo matemático al modelo físico. La validación del modelo matemático con todas las posibles combinaciones de operación, facilitará predecir el comportamiento y se podrán definir las consideraciones cuando el sistema entre en modo de operación ya considerado o estudiado [42].

El modelo matemático que se analiza en este capítulo no es complejo ya que la estructura física base de la microrred, tampoco lo es. La estructura utilizada, cuya naturaleza del sistema físico no es importante en su construcción y análisis de los modelos individuales, sino el comportamiento en conjunto, es tal que los resultados de flujos de carga son acordes con los valores de medición de la microrred eléctrica, así como el correcto comportamiento de un sistema de distribución interconectado a una red de distribución [41]. El sistema físico considera mediciones de corriente y tensión del sistema de distribución, y por considerarse de una microrred cuya fuente principal de generación renovable, son sistemas fotovoltaicos que utilizan mediciones de irradiación y temperatura realizadas para validar los modelos matemáticos.

Para analizar el rendimiento de un sistema de generación fotovoltaica, que podría ser pequeño como el de una microrred, o un sistema grande como el de una granja solar, y que es común que se interconecte a una red de distribución o transmisión, es importante el



conocimiento detallado de las características de las celdas y de los arreglos serie-paralelo que se integrarán para desarrollar un circuito equivalente confiable, es decir, que los resultados se obtengan sean muy cercanos a una microrred física [41]. Para esto en la sección de generación es necesario verificar experimentalmente la curva corriente - tensión (I-V) y que se puedan extraer los parámetros para construir el modelo potencia - tensión (P-V) equivalente [42]. Para el arreglo del sistema de generación fotovoltaica se consideró el arreglo que tiene en su modelo dos diodos, este modelo es el más común, y es una excelente herramienta para predecir en el modelo las condiciones externas como irradiancia, sombreado y temperatura. Para esto se realizaron pruebas para entender los detalles que se obtienen con el arreglo físico al integrar paneles fotovoltaicos [40].

De la misma forma cualquier parámetro no considerado o con un valor fuera de rango afectará la confiabilidad de los resultados del modelo, o en otras palabras existirá una diferencia entre los resultados del modelo matemático contra los resultados obtenidos del arreglo físico, implicaría que el desempeño del sistema no podría ser validado, sino que podría establecerse que los valores de resistencias internas o diodos no son correctos [40].

### **4.3 Descripción del modelo y su estructura**

La herramienta Matlab está estructurada para utilizar y ajustar modelos físicos de sistemas mecánicos, hidráulicos, y eléctricos, entre otros sistemas [45]. Tiene librerías integrado por bloques para facilitar la integración de los componentes eléctricos de una microrred eléctrica o de cualquier sistema eléctrico y el cual deberá seguir el modelo físico. La Figura 4.1 muestra el diagrama unifilar que se utilizará para integrar los modelos.

El modelo está integrado por paneles solares de la marca TrinaSolar, modelo TSM-255PC05A, por convertidores CD-CD con un controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking, por sus siglas en inglés), por inversores, una red de distribución, un transformador de distribución en la subestación y equipos de interconexión a la red de distribución de CFE.

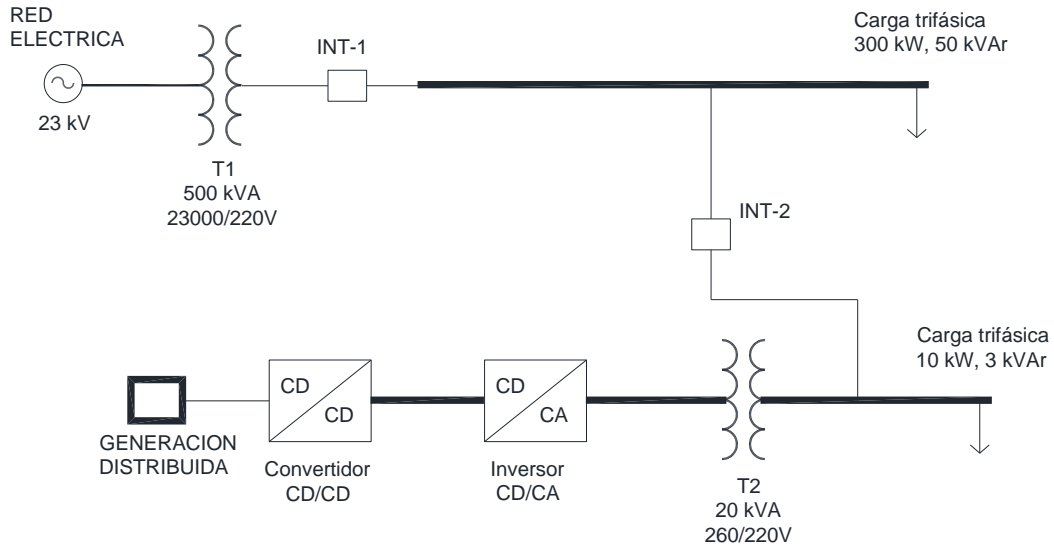


Figura 4.1 Diagrama unifilar de la microrred eléctrica

La celda solar tiene una tensión de circuito abierto dependiendo del fabricante entre 0.5 y 0.8 V. Por otra parte, el panel solar tiene entre 36 y 72 celdas solares, generalmente con un arreglo serie-paralelo. Este arreglo define la tensión de circuito abierto en las terminales de la celda solar, la corriente que puede generar y consecuentemente la potencia de entrega. Para el ejemplo, el panel solar tiene 60 celdas y la generación fotovoltaica está integrada por 18 paneles solares de 250 W. La Figura 4.2 muestra el tipo de panel solar que se utilizará para las simulaciones de la microrred.

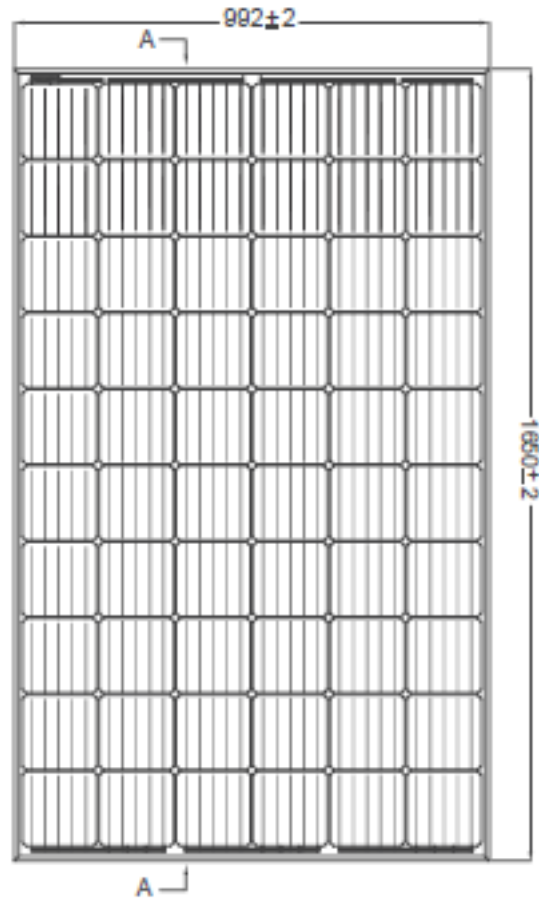


Figura 4.2 Panel con 60 celdas solares (acotaciones en mm)

Con un arreglo en serie de paneles solares se incrementa la tensión en las terminales, mientras que la corriente que circula por el arreglo es constante. Con un arreglo en paralelo de paneles solares se mantiene constante la tensión en las terminales, mientras que la corriente que circula por el arreglo se incrementa. De esta forma se pueden desarrollar los arreglos serie-paralelo de paneles solares que permiten definir la tensión y la corriente deseada para la generación fotovoltaica. Bajo este criterio se establecen las capacidades de generación fotovoltaica para una microrred eléctrica que integra paneles fotovoltaicos, o en su caso para un parque solar. En ambos casos la generación de energía eléctrica está en función de la variación de la radiación solar y de la temperatura.

Existen modelos matemáticos que definen el comportamiento de una celda solar, el circuito eléctrico de una celda solar se puede representar como se indica en la Figura 4.3. Se integra

por una fuente de corriente  $I_L$ , un diodo  $D_1$ , una resistencia en paralelo  $R_{sh}$  y una resistencia en serie  $R_s$  que define la resistencia del paso de la corriente por la celda solar.

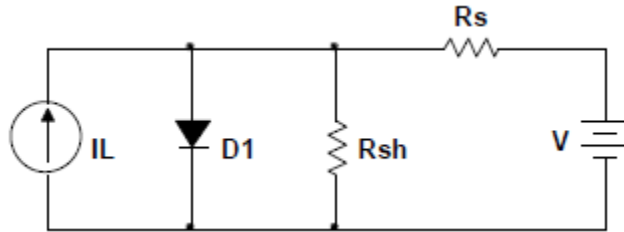


Figura 4.3 Diagrama unifilar de una celda solar

Las características de un panel solar se representan por medio de las curvas I-V y P-V, éstas se muestran en las Figuras 4.4 y 4.5 respectivamente, y corresponden a una especificación de un fabricante para una potencia de 305 W.

La Figura 4.4 muestra la familia de curvas I-V, las variaciones están en función de la irradiancia del sol; en el eje “y” las curvas se muestran de 200 a 1000  $w/m^2$ ; en el eje “x” se muestra la tensión (V), en el mismo eje “y” también se muestra la corriente en amperes (A) e indica la corriente en terminales del panel solar. Con menor radiación solar 200  $w/m^2$ , el módulo genera menos corriente, aproximadamente 2 A, esto es menor potencia, y la tensión de circuito abierto es menor de 40 V de CD, esta misma referencia de tensión de circuito abierto del panel solar es alrededor de 37 V y también se muestra en la tabla de la Figura 3.19, para el mismo modelo.

Estas curvas que corresponden a un modo STC (Standard Test Condition, por sus siglas en inglés) y cuya radiación de referencia son 1000  $W/m^2$ , muestran que con una radiación de 1000  $W/m^2$  la corriente es mayor a 9 amperes, de acuerdo con la tabla de la Figura 4.6, son 9.84 Amperes. Si es constante la radiación solar en el punto de instalación de los paneles solares de la microrred, la corriente es constante en el punto de interconexión (PCC) de la microrred. Sin embargo, dependiendo de las condiciones ambientales, se puede concluir que durante al año la variación de la irradiancia influye finalmente en la potencia final del panel solar o grupo de panel.

Por otra parte, las curvas P-V, Figura 4.5, muestran que es la misma referencia en el eje “x” tensión de circuito abierto del panel solar (V), y en el eje “y” es la potencia de salida (W), la familia de curvas está en función de la irradiancia, y muestra las mismas referencias que van de 200 a 1000 W/m<sup>2</sup>. Por ejemplo, con menor radiación solar 200 W/m<sup>2</sup>, el módulo genera menos potencia, 60 W, y la tensión de circuito es de 37 V de corriente directa, esta misma referencia de tensión de circuito abierto del módulo es alrededor de 37 V, también se muestra en la tabla de la Figura 4.6, para el mismo modelo.

Estas curvas que corresponden a un modo STC y cuya radiación de referencia son 1000 W/m<sup>2</sup>, muestran que para una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> la potencia es arriba de 300 W, con base en la tabla de la Figura 3.19, son 305 W. Si es constante la radiación solar en el punto de instalación de los módulos solares de la microrred, la potencia de salida es constante en el punto de interconexión (PCC) de la microrred. Sin embargo, dependiendo de las condiciones ambientales, se puede concluir que durante al año la variación de la irradiancia influye finalmente en la potencia final del panel solar o grupo de paneles.

Cada una de las familias de curvas están graficadas con una referencia de irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, y una temperatura de 25° C.

La Figura 4.6 muestra una tabla de un fabricante en particular de paneles solares, las características son de paneles con potencia de 280 a 315 Wp. Las características que muestra es la tensión a potencia máxima VMPP, la corriente a potencia máxima IMPP, la tensión a circuito abierto (sin carga) VOC, la corriente de cortocircuito ISC, y la eficiencia en porcentaje  $\eta_m$ . Los datos STC en la tabla de referencia indican que son las condiciones de prueba estándar. Estas condiciones de prueba estándar para los fabricantes es una forma de referencia para que los resultados de las pruebas de los paneles solares puedan ser comparados. En resumen, se comparan tres condiciones de prueba:

Temperatura de la celda – 25°C. Indica la temperatura de la celda solar, no la temperatura del entorno del panel solar.

Irradiancia solar – 1000 W/m<sup>2</sup>. Se refiere a la cantidad de luz que incide en un área definida por un m<sup>2</sup>, y en un tiempo.

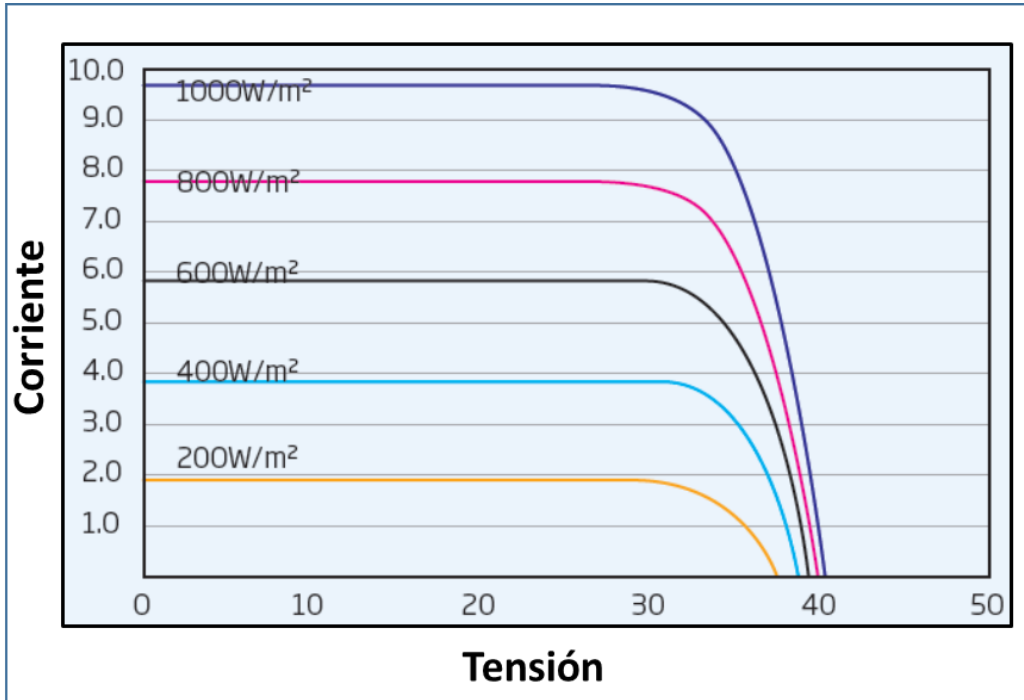


Figura 4.4 Curvas I-V de un panel solar fotovoltaico (305 W)

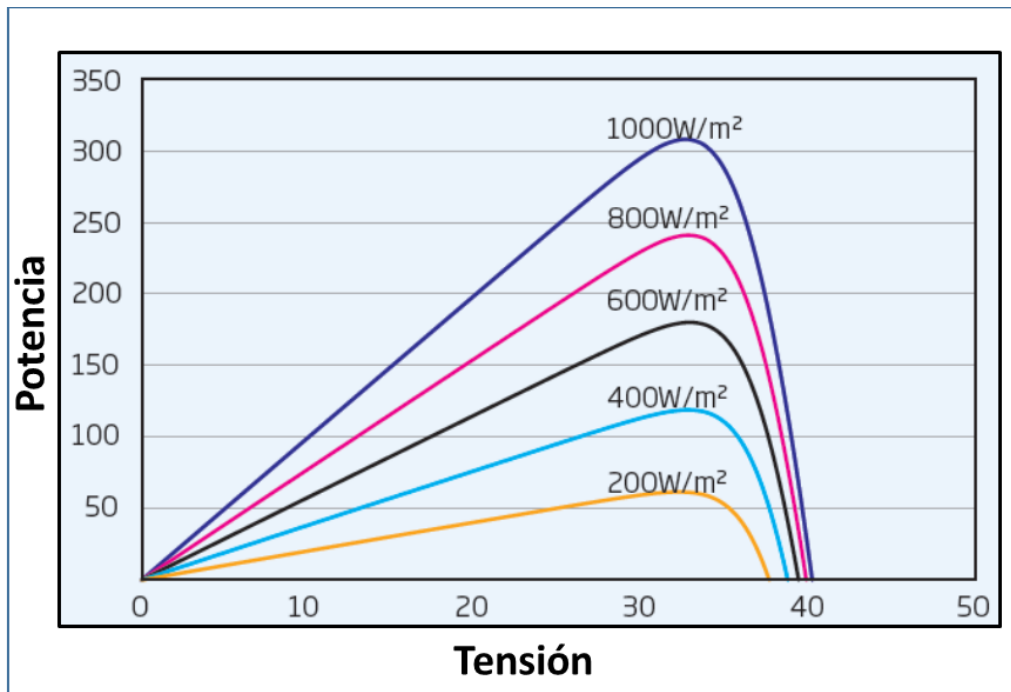


Figura 4.5 Curvas P-V de un panel solar fotovoltaico (305 W)

## ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- $P_{MAX}$ (Wp)*	280	285	290	295	300	305	310	315
Power Output Tolerance- $P_{MAX}$ (W)	0 ~ +5							
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	31.7	31.8	32.2	32.5	32.7	32.9	33.1	33.3
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	8.84	8.96	9.02	9.08	9.18	9.26	9.37	9.46
Open Circuit Voltage- $V_{OC}$ (V)	38.4	38.5	38.7	39.4	39.8	40.0	40.2	40.4
Short Circuit Current- $I_{SC}$ (A)	9.44	9.49	9.59	9.75	9.81	9.84	9.86	9.88
Module Efficiency $\eta_m$ (%)	17.0	17.3	17.6	17.9	18.2	18.5	18.8	19.2

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.

\*Measuring tolerance:  $\pm 3\%$ .

*Figura 4.6 Ejemplo de parámetros eléctricos reales de diferentes modelos de módulos solares*

#### **4.4 Representación del modelo y estructura**

El modelo utiliza los datos del fabricante indicados en la Figura 4.7, están obtenidos del software Matlab. Las gráficas muestran la familia de curvas que se utilizarán en el modelo integral de la microrred. Las simulaciones integrarán diferentes escenarios de operación cuyos tiempos permitan definir diferentes rangos o periodos de rampas para analizar el comportamiento de los flujos de carga en los circuitos, los cuales impactarán en los flujos de carga (kVA, kVAr) que circularán por la red de distribución. Dependiendo de los escenarios de operación de una microrred, por ejemplo en modo interconectado, si hay excedentes en la generación interna tanto de kVA's como de kVAr's, estos flujos fluirán hacia la red de distribución, por otra parte, si la generación de la microrred es menor a la demanda, existirán flujos de la red (CFE) que fluirán hacia la microrred para compensar la demanda de la carga.

En modo de operación isla, la microrred deberá suministrar toda la demanda interna. Si la generación de la microrred es menor en capacidad que la demanda interna, indica que la microrred no tiene capacidad para suministrar y la generación se podría desconectar por sobrecarga. En estos casos es importante integrar un elemento que discrimine carga para mantener el balance entre la generación y la demanda.

Las simulaciones también podrán analizar diferentes escenarios de operación, como máxima y mínima irradiación, diferentes temperaturas referenciadas a 25°C, sombreados de los paneles, etc.; que permitan evaluar el comportamiento de la microrred en forma interconectada o en forma aislada de la red de distribución. También se podrá analizar la corriente de corto circuito que aportará la fuente de generación fotovoltaica, en adelante se observa que el corto circuito (kA's) que aportan los sistemas fotovoltaicos es un valor pequeño, por lo que la aplicación de esquemas de protección convencionales es inviable de integrar en una microrred; por lo que será necesario analizar otras opciones y otros parámetros eléctricos de referencia que permitan detectar fallas en el sistema de distribución de la microrred.



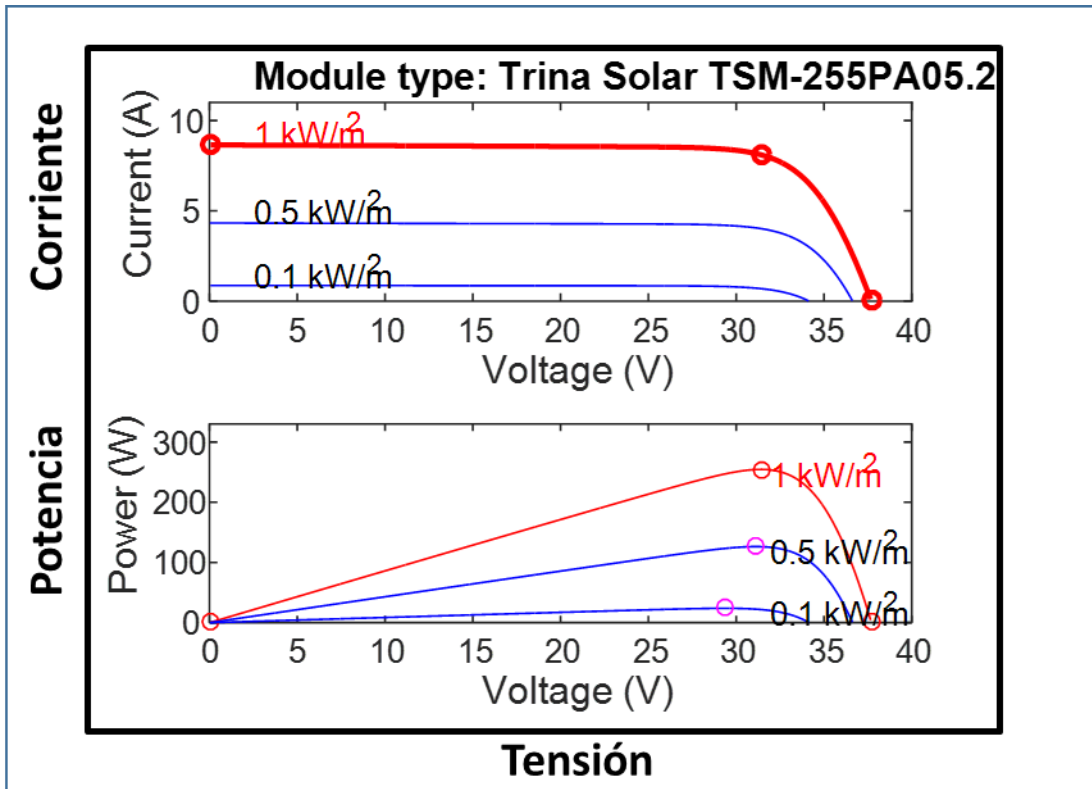


Figura 4.7 Curvas I-V, P-V del panel solar de referencia

La Figura 4.8 muestra el modelo de la microrred con la herramienta Simulink. Se observan los componentes que la integran. Del lado izquierdo se muestra el arreglo de paneles fotovoltaicos, el convertidor CD-CD, el controlador MPPT, el inversor, la red de distribución, cables, transformador, e interconexión a la red eléctrica; el modelo no integra baterías para almacenamiento de energía. Este es un modelo dinámico, generalmente el tiempo de simulación recomendado por el software es de 3 seg. (180 ciclos), tiempo necesario para analizar el comportamiento en estado estable y dinámico. El modelo permitirá conocer el comportamiento de una microrred, puede conocerse si la capacidad de generación puede reducirse o incrementarse dependiendo de las condiciones del tiempo como irradiación y temperatura, de la misma forma se conocerán los flujos de potencia que circulan por la red.

El diagrama se integró considerando que la microrred operará en forma interconectada con un alimentador de distribución de 23 kV, y también puede operar en forma aislada. Puede observarse en la sección superior del diagrama de la Figura 4.28 la red de distribución, del

lado izquierdo se muestra el símbolo de un alimentador de CFE en 23 kV, con una bandera cuadro color naranja se define el bus 1 y se utiliza para identificar en la corrida de flujos de carga los datos de kW y kVar que circulan por el bus. Posteriormente, a la derecha se muestra un transformador de distribución con relación 23000/220 V, impedancia 5%, conexión delta-estrella aterrizada, y también se indica bandera con etiqueta bus 2 para identificar los resultados de la corrida de flujos. En la extrema derecha está conectada una carga tipo inductiva, 30 kW, y 10 kVAr; en el secundario está conectado un interruptor “int-1”. Estos tres elementos integran una pequeña subestación de distribución y son los equipos básicos para la interconexión con una red general de distribución. La interconexión de una microrred con un alimentador de una empresa suministradora (CFE) tiene una ventaja para la microrred, mantiene el respaldo en cuando existe baja generación dentro de la microrred. Cuando existe la capacidad de generación mayor a la demanda, los excedentes circulan hacia el alimentador.

La parte inferior de la red de distribución está conectada a la red de baja tensión con un interruptor “int-2”, con este interruptor se conecta el sistema de generación con paneles fotovoltaicos. La potencia de salida de este grupo de paneles depende de dos funciones de entrada. Las funciones son dos rampas, una de irradiancia y otra de temperatura, cada una de estas entradas pueden ser programadas en sus bloques en función del tiempo. Cada una de estas funciones de entrada, modifica la capacidad de generación del panel en el tiempo; por lo que es posible definir diversas combinaciones de operación, como las siguientes:

- a) La radiación fija 1000 W/m<sup>2</sup>, y la temperatura variable.
- b) La radiación variable, diferente en el tiempo de 1000 W/m<sup>2</sup>, y la temperatura fija.
- c) Ambos parámetros variables.

En la realidad para los sistemas con generación fotovoltaica no es común que ambas funciones de entrada permanezcan fijas, sino que en pequeños instantes de tiempo éstas se presenten. Sin embargo, esta característica plantea grandes retos y esto fundamenta la variabilidad de los sistemas renovables. En esta característica de variabilidad se fundamentan otros estudios, como el pronóstico de la generación en el tiempo, es decir, en un día, una semana, un mes, un año, y como consecuencia en toda la vida útil, ya sea de una microrred eléctrica o de un gran parque solar.

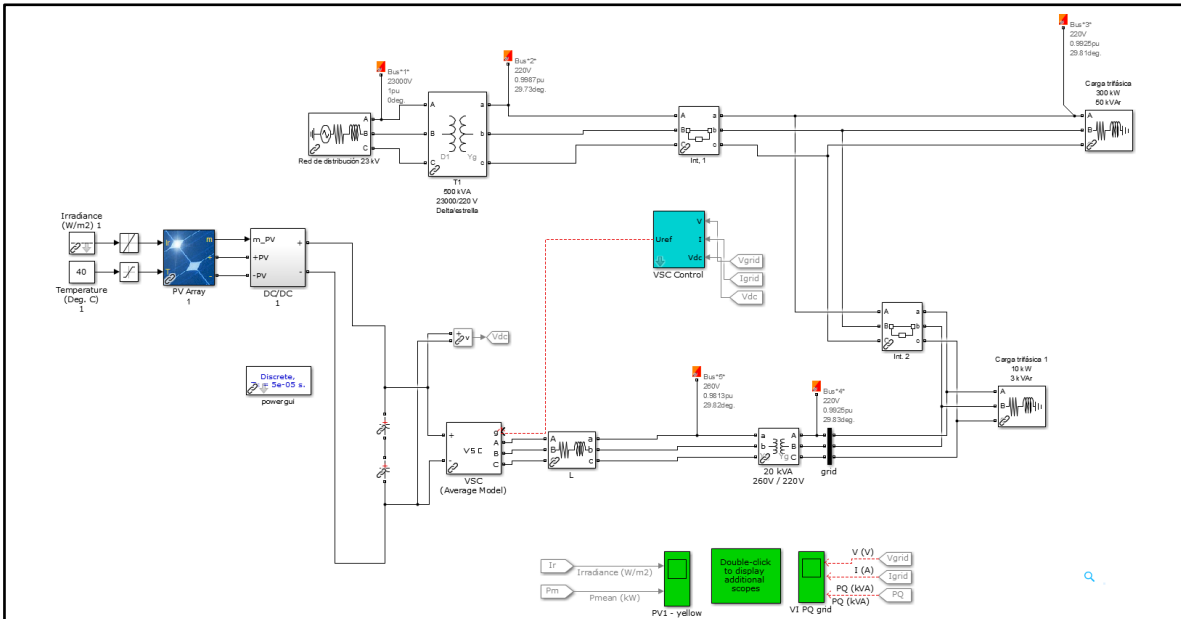


Figura 4.8 Modelo físico de una microrred eléctrica

Las Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, y 4.12 muestran valores de corriente y potencia debidas a un panel solar, o un arreglo de paneles solares. Cada Figura muestra dos gráficas, el lado izquierdo muestra las características de corriente y potencia, el lado derecho muestra la corriente y potencia del arreglo de paneles solares. Se observa que todas las gráficas del lado izquierdo son la misma, ya que muestran las mediciones para un panel solar, es decir, son la referencia.

Los resultados de cada Figura en la gráfica lado derecho muestran valores diferentes de corriente y potencia, esto debido que la potencia de cada arreglo está en función del número de paneles del arreglo.

--	--

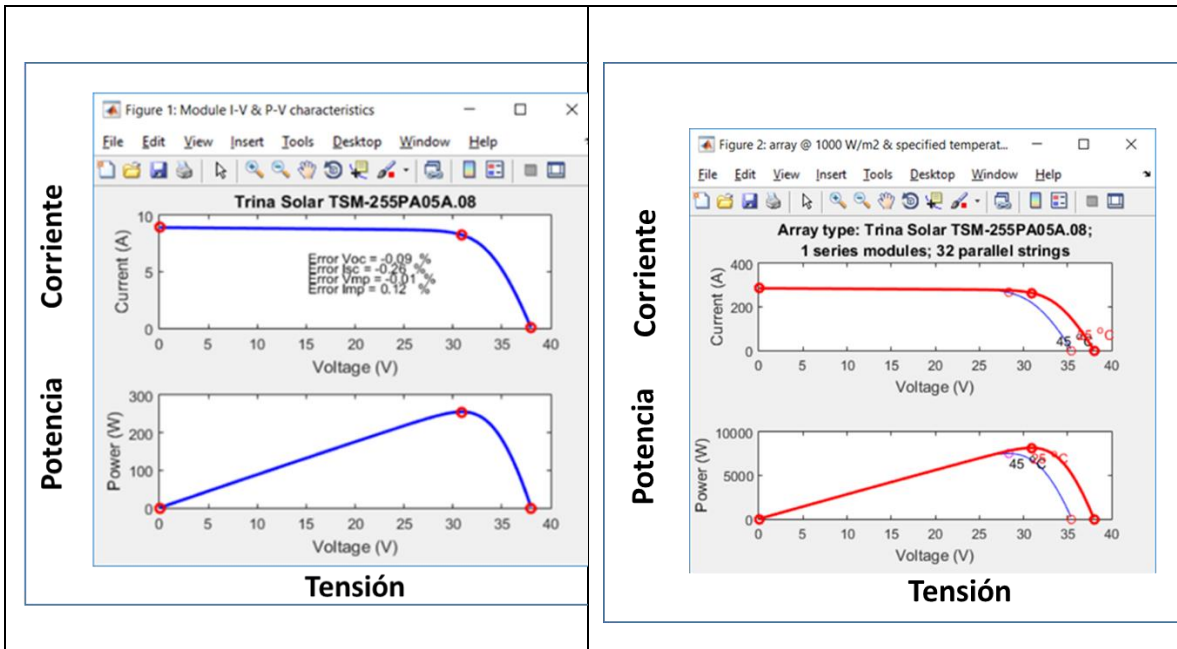


Figura 4.9 Potencia de salida (1 módulo serie, 32 en paralelo)

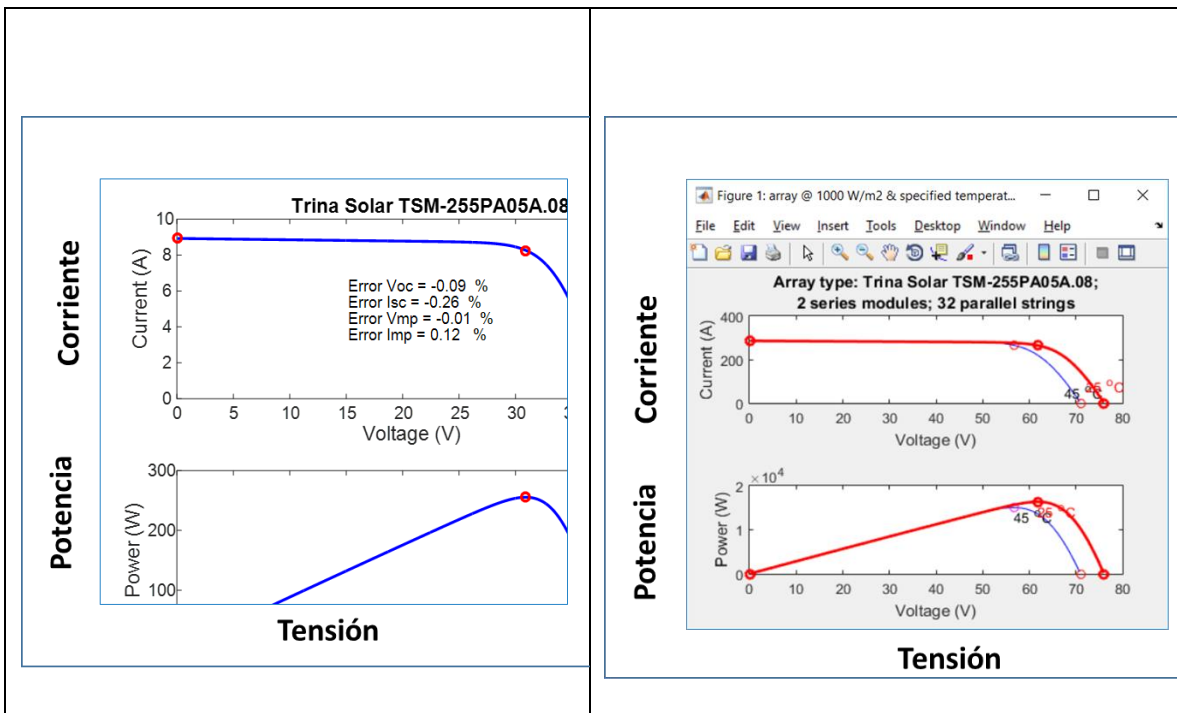


Figura 4.10 Potencia de salida (2 módulos serie, 32 en paralelo)

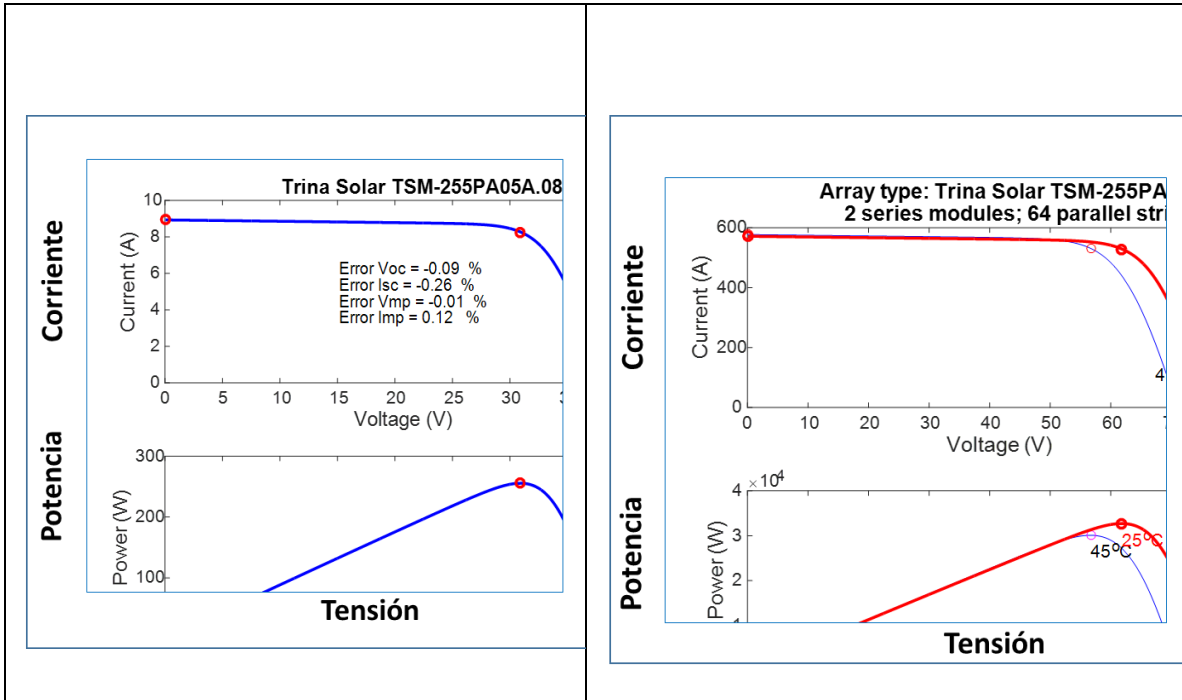


Figura 4.11 Potencia de salida (2 módulos serie, 64 en paralelo)

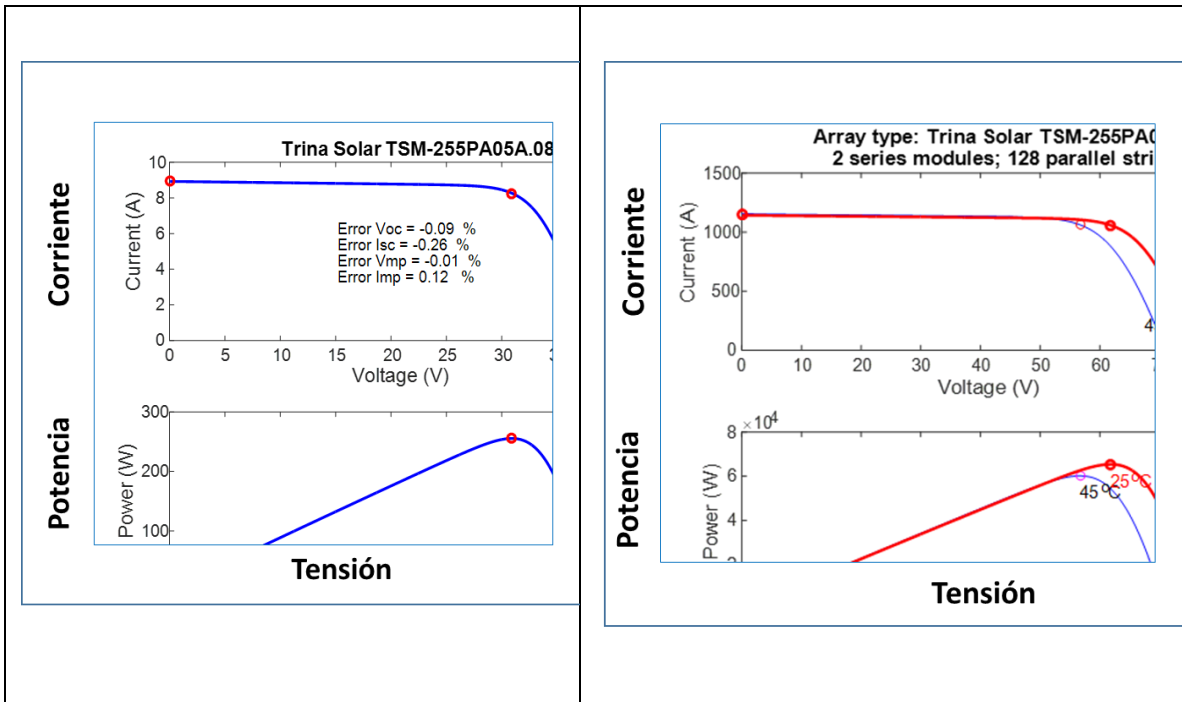


Figura 4.12 Potencia de salida (2 módulos serie, 128 en paralelo)

		Frequency (Hz)	60.0	Base power (VA)	1e+08	Max iterations	50	PQ tolerance (pu)	0.0001					
Block type	Bus type	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (kW)	Q (kvar)	Qmin (kvar)	Qmax (kvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (kW)	Q_LF (kvar)	Block Name
1	RLC load Z	Bus*2*	0.22	1	0.00	300.00	50.00	-Inf	Inf	0.9923	29.90	295.40	49.23	Carga trifásica 300 kW
2	Bus	Bus*2*	0.22	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9987	29.72	0.00	0.00	Bus*2*
3	Vsource swing	Bus*1*	23.00	1	0.00	0.00	0.00	-Inf	Inf	1	0.00	310.59	74.66	Red de distribución 23 kV
4	RLC load PQ	Bus*4*	0.22	1	0.00	10.00	3.00	-Inf	Inf	0.9921	29.83	10.00	3.00	Carga trifásica 10 kW
5	Bus	Bus*5*	0.22	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9909	29.82	0.00	0.00	Bus*4*1

Figura 4.13 Pantalla de salida del modelo físico de la microrred eléctrica

Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran los resultados de flujos de carga del modelo de la microrred en la herramienta Simulink.

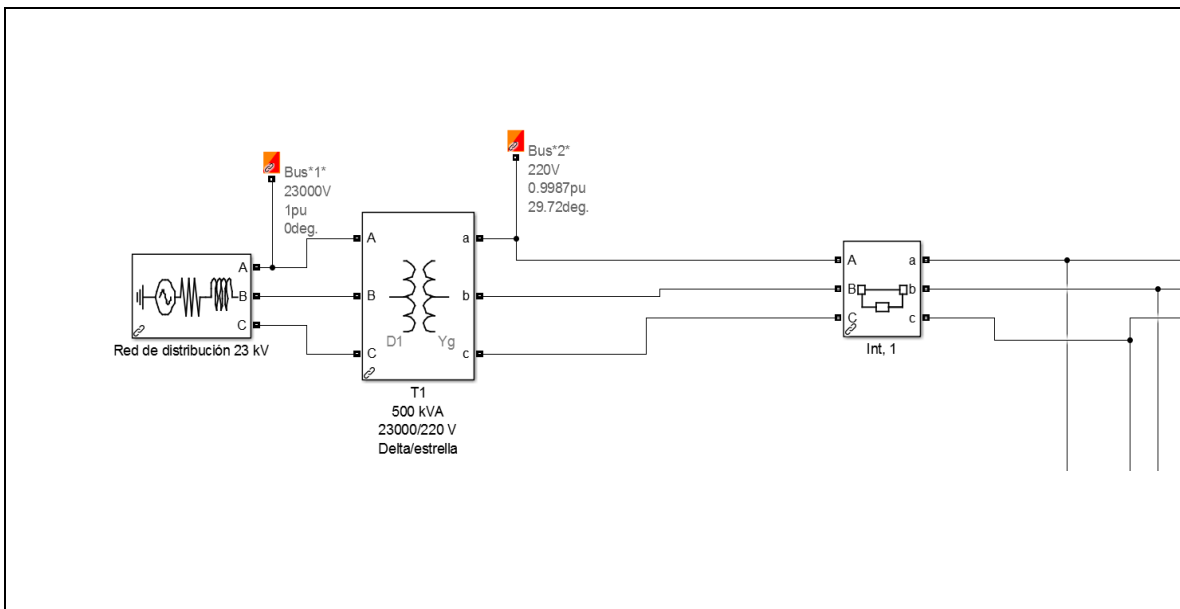


Figura 4.14 Red de distribución 23000/220 V del modelo físico de la microrred eléctrica

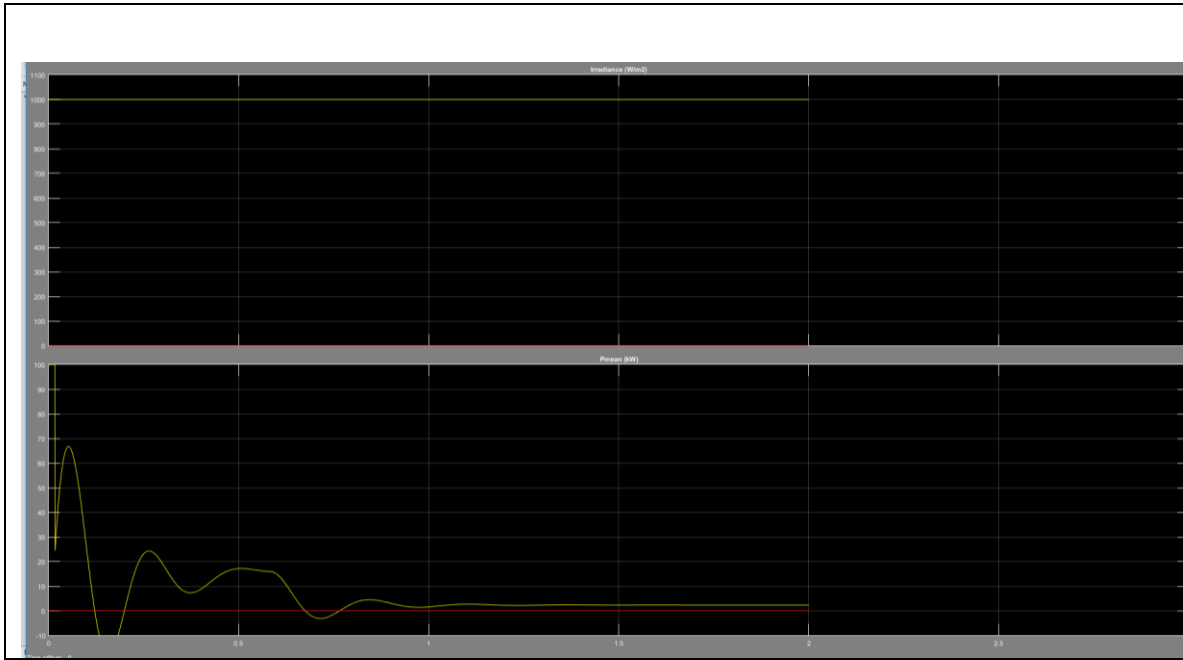


Figura 4.15 Gráfica de irradiación y generación fotovoltaica

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y NECESIDADES EN MÉXICO.**

---

En este capítulo, se describen las conclusiones, los trabajos futuros y las necesidades en México para desarrollar las microrredes y contribuir en el cambio climático reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.



## **5.1 Conclusiones**

En esta tesis se presentaron los resultados de los estudios eléctricos de una microrred eléctrica, los estudios son: flujos de potencia, cortocircuito y calidad de la potencia para un caso en particular, considerando que estos estudios eléctricos son la base para la planeación de una microrred. Estos estudios se utilizan para dimensionar las fuentes de generación renovable o convencional, las cargas, la red de distribución, y la subestación de interconexión con una RGD. Los estudios eléctricos se pueden realizar las veces necesarias con los elementos previamente ya indicados, hasta definir las características técnicas ideales de la microrred, en resumen, los estudios eléctricos en la etapa de planeación de una microrred permiten definir con precisión las características técnicas de todo el equipamiento eléctrico para garantizar su operación. En esta etapa de planeación también se pueden integrar diversas etapas de crecimiento de la generación distribuida en la microrred, los incrementos de carga o un posible cambio en el punto de interconexión con la RGD.

Estos mismos estudios permiten conocer cómo será el comportamiento operativo de la microrred, ya que es posible realizar nuevamente en la etapa de operación los estudios las veces que sea necesario, para conocer algunos detalles no previstos en la etapa de planeación de una microrred. En la etapa operativa se pueden considerar realizar los estudios para realizar expansiones en la generación, incrementar carga, integrar almacenamiento a través de baterías, entre otras cosas. Este proceso de estudios también se puede realizar para conocer el comportamiento de la microrred en la medida que se requiera realizar cambios en su etapa operativa.

El análisis realizado en esta tesis considera equipos de generación fotovoltaica, sin embargo, dependiendo de los recursos energéticos del sitio se pueden integrar pequeñas máquinas eólicas, pequeñas turbinas operadas con biogás, y nuevos sistemas modernos de almacenamiento de energía.

Los resultados de las simulaciones realizadas para una microrred con capacidad de generación fotovoltaica de 150 kW, un generador diésel de 150 kW, un grupo de cargas y una RGD, permiten observar su comportamiento operativo. De esta forma es posible conocer los flujos de potencia que circulan por cada uno de los equipos de la microrred, así como las corrientes de cortocircuito en las barras, y la calidad de potencia.

Por lo anterior, la utilización de software para analizar redes eléctricas en el proceso de planeación de una microrred, permite conocer la viabilidad operativa de estos sistemas, independientemente de su topología, sin importar las capacidades de las fuentes de generación, las cargas y el punto de interconexión. Sin embargo, es importante que los planeadores de microredes conozcan las bases técnicas de los estudios eléctricos para interpretar los resultados y realizar los análisis correspondientes, de manera tal que con dichas bases técnicas puedan afinar las características técnicas y operativas de una microrred.

Los esquemas y análisis de una microrred que se presentaron en este proyecto, permiten planear la integración de una microrred y conocer con anticipación el comportamiento eléctrico del sistema de distribución. El analizador de redes ayuda a realizar los estudios eléctricos básicos como cortocircuito y flujos de potencia que permitan analizar la viabilidad de la integración de cada uno de los componentes eléctricos, además de tener los elementos técnicos para definir y verificar los parámetros eléctricos de los equipos que integran una microrred, por ejemplo, se puede utilizar para dimensionar los transformadores, cables, barras, generación distribuida y las cargas. Por otra parte, también permite con facilidad realizar las modificaciones necesarias de capacidades y volver a correr las funciones del analizador de redes para realizar el análisis eléctrico correspondiente, de esta forma se podrán reducir los tiempos para definir la mejor topología eléctrica de la microrred.

## **5.2    *Trabajos futuros.***

Las modificaciones en las políticas energéticas en los diferentes países han incrementado el interés en la explotación de pequeñas fuentes de generación de energía eléctrica, principalmente para aprovechar los recursos renovables para un sitio en particular. Una de las formas existentes para integrarlas es a través de microredes. Esta generación con pequeñas fuentes renovables y con la infraestructura eléctrica apropiada puede operar en forma aislada para alimentar cargas eléctricas, en otros casos cuando la demanda de energía es mayor que la pequeña generación es necesario que se interconecte a una RGD para mantener la confiabilidad en las cargas eléctricas.

Los trabajos futuros se visualizan para trabajar en el modelado de componentes eléctricos y electrónicos principalmente en convertidores CD/CD y CD/CA, utilizando herramientas

como Matlab para ser integrados con equipos de generación renovables principalmente pequeñas micro-hidráulicas.

### **5.3 Necesidades en México.**

**Integración de microredes en México.** En México la integración de generación distribuida a las RGD se ha mantenido en un crecimiento considerable [45], sin embargo, la integración de microredes es todavía incipiente. Para el desarrollo de microredes en México es necesario realizar su difusión como política pública a través de la Secretaría de Energía, ya que existen espacios en Instituciones públicas, hospitales, escuelas, universidades, mercados y fraccionamientos para su desarrollo. Sin embargo, sí es muy importante que la política pública esté fundamentada con un cierto grado de financiamiento principalmente para la etapa inicial de su desarrollo.

**Microredes aisladas.** En México principalmente por su orografía existen todavía comunidades rurales que no tienen servicio de energía eléctrica. También existe un criterio por parte de CFE Electrificación para aquellas comunidades aisladas que tienen más de 5 km de distancia de una RGD, estas pueden ser electrificadas con sistemas fotovoltaicos aislados. Por lo anterior, es importante desarrollar esquemas híbridos para la instalación de pequeñas máquinas micro-hidráulicas, para aquellas comunidades con recursos energéticos hidráulicos y que permitan incrementar la capacidad y el tiempo de energía; para que las viviendas rurales aprovechen dicha capacidad para incrementar los procesos productivos locales.

**Desarrollo de equipos y dispositivos.** A través de proyectos principalmente financiados por CONACYT, se han desarrollado convertidores CD/CD, inversores, pequeñas máquinas eólicas. Sin embargo, es necesario que las Universidades e Institutos Tecnológicos con carreras afines a electricidad, electrónica y comunicaciones, desarrollen dispositivos y accesorios que puedan instalarse en las microredes. Actualmente la mayor parte de estos equipos son de importación, por lo que se hace necesario el desarrollo de estos equipos para disminuir la dependencia y crear fuentes de trabajo al crear pequeñas empresas que desarrollen estos productos.

**Educación.** Es necesario realizar la integración en las asignaturas de las licenciaturas de Universidades e Institutos Tecnológicos en México de tópicos de microredes. Temas como diseño de topologías, redes de distribución, protecciones, sistemas de control,

comunicaciones, y almacenamiento de energía, deben ser incorporados para incrementar la capacidad de análisis de los educandos de forma tal que estas nuevas capacidades sean aprovechadas cuando estos se integren a la vida laboral.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cigre Working Group C6.22 (October 2015). "Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience", Microgrids Evolution Roadmap.
- [2] R. H. Lasseter, "Microgrids," in Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, pp. 305–308, 2002.
- [3] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution" in Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 04), pp. 4285–4290, June 2004.
- [4] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890-925, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119.
- [5] Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. (2012). Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop.
- [6] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, "Microgrids and Active Distribution Networks", The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [7] <http://galvinpower.org/resources/microgrid-hub/smart-microgrids-faq/examples>.
- [8] A. Paquette, R. Harley, V. Bhavaraju, S. Krstic and P. Theisen, "Design of the Fort Sill microgrid," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, PA, 2014, pp. 4640-4646, doi: 10.1109/ECCE.2014.6954036.
- [9] Gordillo, J. J. Martínez, E. J. J. Rodríguez, J. Arau, A. Capilla, "Experimental 1kW DC Micro-Grid based on PV Systems: Strategy Based on NI LabVIEW Platform C", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 16 No. 10, october 2018, 2625-2633.
- [10] Elías Rodríguez, Agustín Agundis, Rodolfo Orosco, Javier Carmona, Nimrod Vázquez, Alfredo Padilla, Nancy Visairo, Ciro Núñez, "Laboratorio experimental en micro-redes de CD", *Tecnoticias* 306, mayo de 2016.
- [11] Erika H. Rubio Cámara, Luis C. Ordoñez López, Luis Josue Ricalde, Ricardo Javier Peón-Escalante, Emmanuel de la Cruz May, "Diseño de una Micro Red Eléctrica Inteligente con Sistema Fotovoltaico y Celda de Combustible", *Pistas Educativas*, No.

- 120, noviembre 2016. México, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya., noviembre 2018.
- [12] F. Ornelas-Tellez, J. J. Rico-Melgoza, E. Espinosa-Juárez and E. N. Sanchez, "Optimal and Robust Control in DC Microgrids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, no. 6, pp. 5543-5553, Nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2690566.
- [13] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, "Ley de Transición Energética", LTE publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015.
- [14] Javier A. Guacaneme, David Velasco, César L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en microredes", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Bogotá Colombia, octubre 2013.
- [15] Xuesong Zhou, Tie Guo and Youjie Ma, "An Overview on Microgrid Technology", International Conference on Mechatronics and Automation, proceedings of 2015 IEEE.
- [16] Ambarnath Banerji, Debasmita Sen, Ayan K. Bera, Debtanu Ray, Debjyoti Paul, Anurag Bhakat, "MICROGRID: A Review", Meghnad Saha Institute of Technology Kolkata, India.
- [17] Douglas R. Danley, "Defining a Microgrid Using IEEE 2030.7", Business & Technology Surveillance, November 2019.
- [18] IEEE Std 2030.7™-2017, "IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers".
- [19] CENACE, "Diagramas Unifilares del Sistema Eléctrico Nacional", 2019-2024.
- [20] Lubna Mariam, Malabika Basu, and Michael F. Conlon, Electrical Power Research Centre (EPRC), School of Electrical and Electronic Engineering, Dublin Institute of Technology, Kevin Street, Dublin 8, Ireland, "A Review of Existing Microgrid Architectures", Hindawi Publishing Corporation Journal of Engineering Volume 2013, Article ID 937614, 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/937614>.
- [21] Ricardo Saldaña Flores, Energía minihidráulica, abril-junio 2013, Boletín IIE, Breves técnicas.
- [22] The Carbon Trust 2008, "Small-scale wind energy Policy insights and practical guidance", The Carbon Trust is funded by the Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), the Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform,

the Scottish Government, the Welsh Assembly Government and Invest Northern Ireland.

- [23] <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software.html>.
- [24] <https://www.digsilent.de/en/>.
- [25] <https://www.dnvgl.com/services/power-distribution-system-and-electrical-simulation-software-synergi-electric-5005>.
- [26] Sudheer Sukumaran, I. Vidya, M.D. Sangeetha, K. Renu priya, “Optimal Power Flow Analysis for 23MW Microgrid using ETAP”. International Journal of innovative Science an research Technology, Volume 3, Issue 3, March– 2018.
- [27] Supachai Klungtong, Chow Chompoo-inwai, “Power Flow Monitoring and Analysis for 24.6 MW at 6.9 kV Bus Diesel Power Plant (DPP) Using ETAP”, 2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies.
- [28] Carlos Gamarra, Josep M. Guerrerob, a Department of Electromechanical Engineering, University of Burgos, Spain, b Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, “Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review.”, july 2014.
- [29] Sneha Kulkarni, Sunil Sontakke, “Power System Analysis of a Microgrid using ETAP”, International Journal of Innovative Science and Modern Engineering (IJISME) ISSN: 2319-6386, Volume-X, Issue-X.
- [30] Zaid Rehman, Waqas Hussain, Rizwan Ullah, Zaki-ud-din, “Load Flow Analysis of 132/11KV Substation Using ETAP: A Case Study”, Sarhad University International Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 1, 2017.
- [31] Guanghao Liu, Dept.Technical of ETAP, ETAP (Beijing) Automation Technology Co., Ltd. ChengDu,China, “Application of ETAP in distributed power supply and micro-grid interconnection”, International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG2019), 6-9 Sept., Yichang China, 2019.
- [32] Piyush R. Kadukar, Pranay S. Shete, S. P. Gawande, Electrical Engineering Dept. YeshwantraoChavan College of Engineering Nagpur, India, “Transient Analysis of Distributed Generation AC Microgrid using ETAP”, Proceeding of 2018 IEEE

International Conference on Current Trends toward Converging Technologies, Coimbatore, India.

- [33] Izzatillaev, J.O. Determination of Power Flows in Microgrids with Renewable Energy Sources by Using Special Computer Programs. *Appl. Sol. Energy* 56, 149–155 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0003701X20020061>
- [34] <https://etap.com/es/home>.
- [35] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Overbye, “Power System Analysis and Design”, Cengage Learning, Fifth Edition, 2012, ISBN: 978-1111425777.
- [36] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr., “Análisis de Sistemas de Potencia”, Ed. Mc Graw Hill, 2001, ISBN: 970-1009088.
- [37] Nasser D. Tleis, “Power System Modelling and Fault Analysis, Theory and Practice”, Elsevier Ltd, 2008, ISBN: 978-0750680745.
- [38] Thomas Allen Short, “Electric Power Distribution Handbook”, CRC Press, 2014, ISBN: 978-1466598652.
- [39] Secretaría de Energía, “NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización)”, Diario Oficial de la Federación México, Noviembre 2012, Web: <http://www.issste-cmn20n.gob.mx/Datos/Normas/136NOM.pdf>.
- [40] Mohammed S. Ibbini, Shadi Mansi, Mohammed Masadeh, Eid Al Hajri, “Simscape Solar Cells Model Analysis and Design”, *Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy*.
- [41] Prasenjit Basak, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury. (2013) “Simscape Based Modelling and Simulation of a PV Generator in Microgrid Scenario”, 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, 10-13, CIRED, Paper 0997.
- [42] Mohammad Seifi, Azura Bt. Che Soh, Noor Izzrib. Abd. Wahab, and Mohd Khair B. Hassan. (2013). “A Comparative Study of PV Models in Matlab/Simulink”, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* Vol. 7, No. 2.
- [43] Mr. G. Venkateswarlu, Dr.P.Sangameswar Raju. (2013) “Simscape Model of Photovoltaic Cell”, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* Vol. 2, Issue 5, May 2013.

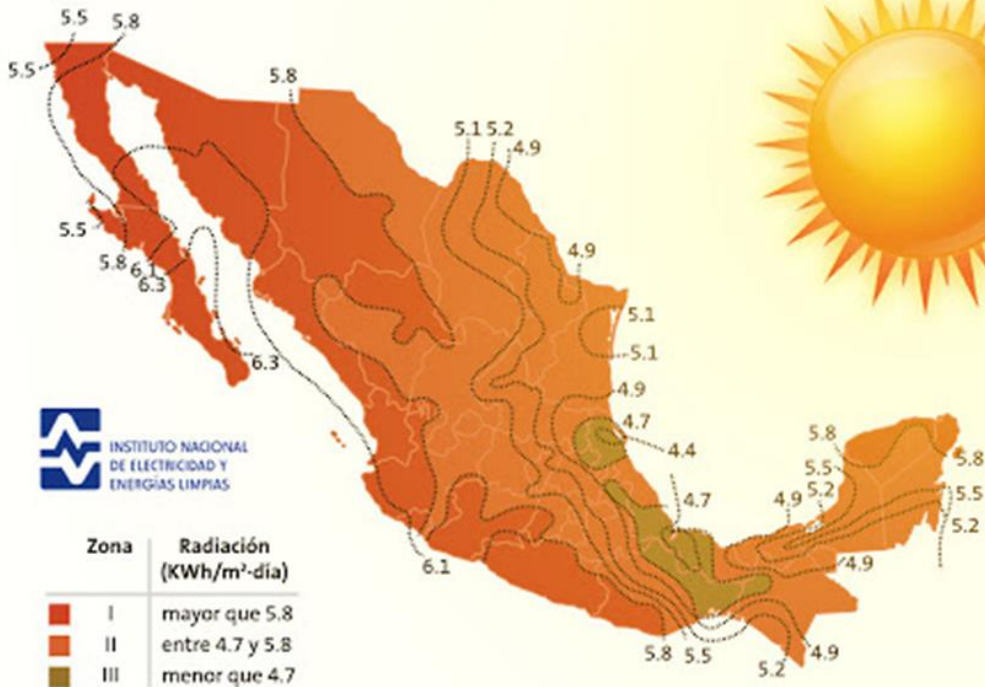


- [44] The Mathworks SimPowerSystems, TransÉnergie Technologies, Hydro-Québec, for Use with Simulink, User's Guide, version 3, 2002.
- [45] Comisión Reguladora de Energía, "Energías limpias: Oportunidad para lograr la transición energética soberana y cumplir los compromisos internacionales para enfrentar la emergencia climática." Ciudad de México, febrero 26 de 2020.

# ANEXO 1.

## Radiación solar diaria promedio anual en México

Ciencia UNAM



Imágenes: Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e Industrial  
 Diseño: Bárbara Castrejón, DGDC-UNAM