



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

ROL DEL MICROFORMER EN REDES ELÉCTRICAS DE PEQUEÑA ESCALA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

RICHARD EMMANUEL SANDOVAL PICHUMÁN

PROFESOR GUÍA:

PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GUILLERMO JIMENEZ ESTÉVEZ

NELSON MORALES OSORIO

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Electricista
POR: Richard Sandoval Pichumán
FECHA: 28/06/2016
PROFESOR GUÍA: Patricio Mendoza Araya

ROL DEL MICROFORMER EN REDES ELÉCTRICAS DE PEQUEÑA ESCALA

El proyecto “The Microformer”, presentado el año 2010 en una competencia local en la Universidad de Wisconsin-Madison, consiste en la propuesta de un sistema de electrificación basado en transformadores de bajo costo. Estos transformadores están contruidos con componentes reciclados de basura electrónica, específicamente obtenidos de hornos de microondas, que facilitan la electrificación de zonas de baja densidad de población (por ejemplo, zonas rurales) mejorando la eficiencia del sistema de transmisión/distribución eléctrica. A pesar de que existe un buen conocimiento sobre el comportamiento del Microformer como unidad, no existen estudios a nivel de sistema que involucren uno o más Microformers dentro de una red. Además, el Microformer nunca ha sido modelado en un ambiente de generación distribuida con múltiples puntos de inyección. Desde el punto de vista del sistema, el Microformer debiera comportarse como cualquier otro transformador. Sin embargo, sus características eléctricas son bastante diferentes comparado con transformadores de distribución comerciales.

En el presente trabajo de título se pretende estudiar el comportamiento del Microformer a nivel de sistema. Para ello se presentan tres casos globales de estudio con el fin de observar y mejorar el comportamiento del Microformer en redes compuestas por los mismos. Primero se construye una red trifásica de laboratorio con ocho Microformers reproduciendo una topología rural, luego se implementa dicha red en el software de cálculo DigSILENT PowerFactory para cubrir casos que son imposibles recrear en la red experimental. Finalmente, se inserta el Microformer en una red modelo de la IEEE teniendo en cuenta las consideraciones y conclusiones obtenidas de los casos de estudios previos.

A diferencia de trabajos anteriores, los transformadores de microondas son modificados según la función que cumplan en una red de distribución. Para los Microformers de subida se mantiene una razón de transformación de 9,1 con tal de obtener 2 kV en alta tensión. Por otro lado, debido a la mala regulación de los Microformers de bajada, es imperante modificar su razón de transformación al mínimo posible mediante la adición de espiras para compensar así la caída de tensión debido a los flujos de fuga y las pérdidas Joule en sus enrollados. Además, para mejorar aún más la regulación se aprovechan los condensadores de alta tensión que vienen en los hornos microondas.

En este trabajo se dan una serie de recomendaciones para futuras redes que se construyan con Microformers a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, entre ellas se encuentran el descarte previo de transformadores de microondas que no cumplan con los resultados mínimos esperados en las pruebas típicas; reducción de la potencia nominal de los Microformers a 660 VA; modificación de los Microformers según su función en la red; largos mínimos y máximos de líneas para que el uso de Microformers sea justificado y que se encuentre dentro de la norma.

Como trabajo futuro se propone hacer un estudio estadístico de transformadores de microondas analizando qué tanto varían los parámetros eléctricos entre hornos de microondas de una misma marca o modelo, esto con el fin de determinar si es posible construir bancos trifásicos de transformadores con más de tres Microformers en paralelo. También se propone mejorar los niveles de armónicos de tensión y corriente implementando filtros de armónicos u otros métodos similares.

Finalmente se deja construida una red experimental con fines pedagógicos en el Laboratorio de Máquinas del Departamento de Ingeniería Eléctrica, por lo que se propone realizar una guía de laboratorio para que los alumnos estudien los casos abarcados en este trabajo.

*A mis amados padres,
que esto significa mucho más para ellos que para mí.*

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a mis padres Rosita y Richard que me han apoyado y han estado presente a lo largo de mi vida académica. A ustedes les debo, en gran parte, este logro. No diré que son los mejores padres del mundo (¿cómo se puede medir eso?) pero de lo que si estoy seguro es que me han entregado mucho más de lo que merezco.

A mi hermana Damaris que es parte importante de mi vida y que ha estado siempre brindándome su apoyo incondicional.

A mi segunda familia, Mi tío Daniel (que de paso me ayudó a construir la mesa de la red de Microformers) que siempre tiene la mejor de las disposiciones para ayudar, a Paola que es como mi hermana mayor y a sus hijas Anabela y Raquel que son mis hermanas en la práctica, espero ser de ejemplo para ustedes.

A mi profesor guía, Patricio Mendoza, que me ha dado la confianza y el apoyo en momentos difíciles que he pasado durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ori, el Maya, el Joni y el Demi que son mis amigos que me ha dado las circunstancias académicas pero que mis recuerdos más importantes no están ambientadas precisamente en las aulas de clases. Gracias por los grandes momentos que hemos vivido juntos y espero que se sigan repitiendo hasta por muchos años más. Los quiero niños.

A los niños Eolian 4, que aprendimos juntos experiencia de vida. De ellos quiero agradecer especialmente a Javier que hemos construido una linda amistad desde entonces y que me ayudó a construir desinteresadamente parte de la red experimental, sin su ayuda me hubiese tomado más tiempo en concluirla y con riesgos de quedar con terminaciones deficientes.

A la Mayoría Banda que apareció recientemente en un momento que necesitaba levantar cabeza. Tocar en la banda me ha servido sin duda para inyectarle energía a mi vida y poder terminar este proceso universitario e iniciar otro nuevo que me era desconocido hasta entonces. Gracias al “Poke” Javier y al Hoskar por dejarme ser parte de su proyecto musical y por todas esas “subvenciones” que entregaban después de cada ensayo.

A mi prima y amiga Nati que en este último tiempo me ha apoyado bastante y ha estado preocupada por mí siempre actuando con la mejor de las intenciones, gracias a ella he conocido gente linda que me ha entregado buenos momentos.

Tabla de Contenido

Resumen	i
Agradecimientos	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general.....	1
1.1. Objetivos específicos.....	1
1.3. Estructura de la memoria.....	2
Capítulo 2 Marco teórico	3
2.1 Transformador de Poder.....	3
2.1.1 Introducción.....	3
2.1.2 Transformador ideal de dos enrollados.....	3
2.1.3 Transformador real.....	5
2.1.4 Rendimiento.....	11
2.1.5 Regulación de tensión.....	11
2.1.6 Ensayos a transformadores.....	11
2.1.7 Conexión en paralelo de transformadores monofásicos.....	14
2.2 Microformer.....	15
2.2.1 Introducción.....	15
2.2.2 El transformador de horno microondas (<i>MOT</i>).....	15
2.2.3 Modificación de los <i>MOT</i> 's.....	15
2.2.4 Resultados de estudios previos del Microformer.....	16
2.2.5 Adaptación del <i>MOT</i> como transformador de distribución.....	18
2.3 Sistemas de distribución.....	19
2.3.1 Características de los sistemas de distribución.....	19
2.3.2 Tipos de sistema de distribución.....	20
2.3.3 Sistema de distribución rural.....	20
2.4 Regulación de tensión.....	21

2.4.1	Tetrapolo del Microformer (circuito T o estrella)	21
2.4.2	Diagrama del extremo receptor y regulación de transmisiones radiales con admitancia.....	22
2.5	Estándares y normas.....	23
2.5.1	Niveles de tensión	23
2.5.2	Armónicos	24
2.5.3	Temperatura.....	25
Capítulo 3 Implementación.....		26
3.1	Construcción de Microformers	26
3.1.1	Caracterización de MOT's.....	26
3.1.2	Modificación de MOT's	29
3.2	Red experimental	31
3.2.1	Requerimientos.....	31
3.2.2	Diseño.....	31
3.2.3	Red experimental propuesta.....	36
3.2.4	Construcción.....	37
3.3	Modelo de red experimental en DigSILENT.....	41
3.3.1	Descripción	41
3.3.2	Componentes.....	42
Capítulo 4 Análisis y resultados		47
4.1	Pruebas de los Microformers.....	47
4.1.1	Primeras pruebas	47
4.1.2	Segundas pruebas.....	51
4.1.3	Análisis de resultados	54
4.2	Pruebas de la red experimental.....	57
4.2.1	Descripción general	57
4.2.2	Prueba sin condensadores	57
4.2.3	Prueba con condensador en alta tensión	58
4.2.4	Prueba con condensadores en baja	59
4.2.5	Armónicos	60
4.3	Simulaciones del modelo de la red experimental en DigSILENT.....	64
4.3.1	Prueba sin condensadores	64
4.3.2	Prueba con condensador en alta.....	65

4.3.3	Prueba con condensadores en baja	66
4.4	Análisis de las pruebas de la red experimental y su modelo en DigSILENT.....	67
4.4.1	Análisis de resultados	67
4.4.2	Validación del modelo.....	68
4.5	Simulación y análisis del modelo de red experimental en DigSILENT	71
4.5.1	Descripción	71
4.5.2	Caso Base	71
4.5.3	Caso 1: Microformers alimentadores en paralelo.....	72
4.5.4	Caso 2: Condensadores óptimos en alta	74
4.5.5	Caso 3: Generación distribuida	81
4.5.6	Caso 4: Red aislada.....	83
4.5.7	Observaciones generales	85
4.6	Incorporación del Microformer en red IEEE	87
Capítulo 5 Conclusiones		90
Bibliografía		93
Anexo A: Modelo de red IEEE de 34 nodos.....		95

Lista de Figuras

Figura 2.1: Principio de funcionamiento del transformador de dos enrollados	3
Figura 2.2: Circuito magnético equivalente.....	5
Figura 2.3: Flujo mutuo y flujos de fuga.....	6
Figura 2.4: Circuito equivalente incluyendo el efecto de flujos de fuga.	8
Figura 2.5: Circuito equivalente incluyendo resistencias de los enrollados.....	8
Figura 2.6: Circuito equivalente incluyendo reactancia de magnetización.....	9
Figura 2.7: Corriente en vacío para núcleo con pérdidas [5].....	10
Figura 2.8: Representación fasorial de corriente en vacío para núcleo con pérdidas [5].	10
Figura 2.9: Circuito equivalente exacto del transformador real.	11
Figura 2.10: Prueba de polaridad con corriente continua.....	12
Figura 2.11: Prueba de circuito abierto	13
Figura 2.12: Prueba en cortocircuito.	14
Figura 2.13: Unidad MOT típica [1].	15
Figura 2.14: Adición de espiras a enrollado primario [7].....	16
Figura 2.15: Esquema del contenedor del MOT hecho con tarro de pintura y bornes de PVC [1].....	18
Figura 2.16: Sistema eléctrico típico donde se muestra las divisiones operacionales [10]...	19
Figura 2.17: Circuito T o estrella.....	21
Figura 2.18: Diagrama del extremo receptor [2].....	23
Figura 3.1: Dimensiones del núcleo.....	26
Figura 3.2: MOT 1	27
Figura 3.3: MOT 2	27
Figura 3.4: MOT 3	27
Figura 3.5: MOT 4	27
Figura 3.6: MOT 5.....	27
Figura 3.7: MOT 6	27
Figura 3.8: MOT 7	28
Figura 3.9: MOT 8	28
Figura 3.10: MOT 9.....	28
Figura 3.11: MOT 10	28
Figura 3.12: Red experimental propuesta.....	32
Figura 3.13: carga resistiva	34
Figura 3.14: Condensador de baja tensión (a) y condensador de microondas de 2kV (b) ...	35
Figura 3.15: Esquema de la red experimental	36
Figura 3.16: Contenedor de MOT's	37
Figura 3.17: Resistencia construida con alambre de tantalio y acrílico	38
Figura 3.18: Vista superior de caja de resistencias	38
Figura 3.19: Condensadores de alta	39
Figura 3.20: Caja contenedora de seis resistencias junto al arreglo de condensadores	39
Figura 3.21: Red experimental de Microformers	40
Figura 3.22: Red experimental implementada en DigSILENT.....	41
Figura 3.23: Modelo del transformador en DigSILENT [16]	43

Figura 3.24: Conexión D-D para transformador monofásico [16]	44
Figura 3.25: Carga fase neutro [16]	45
Figura 4.1: Variación de la temperatura de los transformadores en el tiempo.....	48
Figura 4.2: Esquema de prueba de regulación	51
Figura 4.3: Curva de saturación de los MOT's de bajada	53
Figura 4.4: Curva de saturación de los MOT's de subida.....	54
Figura 4.5: Curvas saturada y no saturada del MOT 6.....	56
Figura 4.6: Flujo de potencia del caso base	72
Figura 4.7: Flujo de potencia con Microformers de subida en paralelo	73
Figura 4.8: Flujo de potencia del caso base con condensadores en alta.....	76
Figura 4.9: Flujo de potencia con Microformers trifásicos en paralelo y condensadores	79
Figura 4.10: Flujo de potencia con transformador industrial y compensación.....	80
Figura 4.11 Flujos de potencia con generación distribuida	82
Figura 4.12: Flujos de potencia con MOT 11 en generación distribuida.....	83
Figura 4.13: Flujo de potencia para la red experimental aislada	85
Figura 4.14: Modelo de red IEEE 34 nodos.....	87
Figura 4.15: Red 2.3 y 3.1 en la red modelo IEEE 34 nodos	89

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Parámetros del MOT norteamericano referido al primario.....	17
Tabla 2.2: Parámetros del MOT norteamericano referido al primario sin barras magnéticas.	17
Tabla 2.3: Parámetros del MOT chileno referido al primario con distintas modificaciones.	17
Tabla 2.4: Límites de distorsión de tensión.....	24
Tabla 2.5: Límites de distorsión de corriente para sistemas entre 120 V y 69 kV	24
Tabla 3.1: Dimensiones de los transformadores	27
Tabla 3.2: Datos de placa de los transformadores	28
Tabla 3.3: Número de vueltas calculados para cada transformador	30
Tabla 3.4: Número de espiras extras por transformador.....	30
Tabla 3.5: Posición final de los Microformers	32
Tabla 3.6: Características del cable de 14 AWG	33
Tabla 3.7: Características de las líneas del circuito propuesto	34
Tabla 3.8: Valores de las cargas resistivas	34
Tabla 3.9: Características de los condensadores.....	35
Tabla 3.10: Valores de resistencia de línea del laboratorio.	38
Tabla 3.11: Tensiones nominales de las barras	42
Tabla 3.12: Parámetros del transformador trifásico MOT 3F	43
Tabla 3.13: Parámetros de los Microformers de bajada.....	44
Tabla 3.14: Potencia nominal de las cargas.....	45
Tabla 3.15: Características de los condensadores	45
Tabla 3.16: Parámetros de línea	46
Tabla 4.1: Resultados de la prueba de calentamiento	47
Tabla 4.2: Razón de transformación de los MOT's sin barras magnéticas y modificados	49
Tabla 4.3: Resultados de la prueba en vacío	49
Tabla 4.4: Resultados de la prueba de cortocircuito.....	50
Tabla 4.5: Resultados de la prueba de regulación MOT 2.....	51
Tabla 4.6: Razón de transformación de los MOT's de bajada	52
Tabla 4.7: Resultado de la prueba en vacío para los MOT's de bajada.....	52
Tabla 4.8: Resultados de la prueba de cortocircuito para los MOT's de bajada	52
Tabla 4.9: Resultados de la prueba de regulación MOT 2 modificado.	54
Tabla 4.10: Parámetros de los Microformers.	55
Tabla 4.11: Valores promedios de los parámetros.	55
Tabla 4.12: Prueba sin condensadores en vacío.....	58
Tabla 4.13: Prueba sin condensadores a media carga.....	58
Tabla 4.14: Prueba sin condensares a plena carga	58
Tabla 4.15: Prueba con condensador en alta en vacío	59
Tabla 4.16: Prueba con condensador en alta a media carga	59
Tabla 4.17: Prueba con condensador en alta a plena carga	59
Tabla 4.18: Prueba con condensadores en baja en vacío	60
Tabla 4.19: Prueba con condensadores en baja a media carga.....	60
Tabla 4.20: Prueba con condensadores en baja a plena carga.....	60

Tabla 4.21: Distorsión armónica en vacío	61
Tabla 4.22: Distorsión armónica a plena carga	61
Tabla 4.23: Distorsión armónica en vacío con condensadores de alta tensión.	62
Tabla 4.24: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de alta tensión.	62
Tabla 4.25: Distorsión armónica en alimentador en vacío con condensadores de baja tensión.....	63
Tabla 4.26: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de baja tensión.	63
Tabla 4.27: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de baja tensión sin MOT's 8 y 10.	64
Tabla 4. 28: Resultados de la prueba sin condensadores en circuito abierto en DigSILENT	64
Tabla 4.29: Resultados de la prueba sin condensadores con carga C1 en DigSILENT.....	65
Tabla 4. 30: Resultados de la prueba sin condensadores con carga C2 en DigSILENT.....	65
Tabla 4.31: Resultados de la prueba con condensador 3 en circuito abierto en DigSILENT	65
Tabla 4. 32: Resultados de la prueba con condensador 3 bajo carga C1 en DigSILENT.....	66
Tabla 4.33: Resultados de la prueba con condensador 3 bajo carga C2 en DigSILENT.....	66
Tabla 4.34: Resultados de la prueba con condensadores en baja en vacío en DigSILENT....	66
Tabla 4.35: Resultados de la prueba con condensadores en baja con carga C1 en DigSILENT	67
Tabla 4.36: Resultados de la prueba con condensadores en baja con carga C3 en DigSILENT	67
Tabla 4.37: Errores entre los resultados de las pruebas en vacío de la red y su modelo	69
Tabla 4.38: Errores entre los resultados de las pruebas con condensador en alta de la red y su modelo.....	69
Tabla 4.39: Errores entre los resultados de las pruebas con condensadores en baja de la red y su modelo	70
Tabla 4.40: Errores entre los MOT's de subida y el MOT 3F	70
Tabla 4.41: Potencia nominal de los consumos del caso base.....	71
Tabla 4.42: Consumo de reactivos de los Microformers de bajada.....	75
Tabla 4.43: Consumo total de reactivos en la red por fase a plena carga	76
Tabla 4.44: Potencia nominal de los consumos nuevos.....	77
Tabla 4.45: Potencia reactiva consumida por fase en la red.....	77
Tabla 4.46: Largo de líneas para el caso 3.....	81
Tabla 4.47: Fuentes de generación	81
Tabla 4.48: Microformers usados para el caso 4	84
Tabla 4.49: Consumo y generación de potencia reactiva	84
Tabla 4.50: Resistividad de conductores	86
Tabla 4.51: Sección transversal de conductores.....	86
Tabla 4.52: Largos máximos de línea por Microformer.....	86
Tabla 4.53: Largo mínimo de línea.....	87
Tabla 4.54: Variación de potencia en el nodo 888	88

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

El proyecto “The Microformer”, presentado el año 2010 en una competencia local en la Universidad de Wisconsin-Madison, consiste en la propuesta de un sistema de electrificación basado en transformadores de bajo costo. Estos transformadores están contruidos con componentes reciclados de basura electrónica, y facilitan la electrificación de zonas de baja densidad de población (por ejemplo, zonas rurales) mejorando la eficiencia del sistema de transmisión/distribución eléctrica.

En cuanto al desarrollo teórico y experimental del Microformer, los resultados de la primera etapa del proyecto fueron publicados en la conferencia *Global Humanitarian Technology Conference* [1] en el que se propone una modificación al transformador de horno de microondas para mejorar su eficiencia ante su uso como transformador de distribución.

A pesar de que existe un buen conocimiento sobre el comportamiento del Microformer como unidad, no existen estudios a nivel de sistema que involucren uno o más Microformer dentro de una red. En los proyectos piloto existentes (dos y tres nodos) la potencia es unidireccional. Además, el Microformer nunca ha sido modelado en un ambiente de generación distribuida con múltiples puntos de inyección. Es necesario entonces estudiar la aplicación del Microformer a sistemas eléctricos más generales. Desde el punto de vista del sistema, el Microformer debiera comportarse como cualquier otro transformador. Sin embargo, sus características eléctricas son bastante diferentes comparado con transformadores de distribución comerciales.

1.2 Objetivo general

Estudiar el uso de Microformers en sistemas de distribución de pequeña escala, tanto aislado como conectado a la red.

1.1. Objetivos específicos

Para poder cumplir el objetivo general del trabajo de título es necesario definir los siguientes objetivos específicos:

- Comparar el desempeño del Microformer con transformadores de distribución comercial e industrial de similares características. Discutir el impacto que pueden crear las diferencias entre ambos tipos de transformadores.

- Desarrollar casos de estudio que cubran problemas de operación que puedan aparecer ante la presencia de Microformers.
- Estudiar la interconexión en paralelo de Microformers para aplicaciones de mayor potencia.
- Entender el impacto de las diferentes conexiones de transformadores en cuanto a consumo de potencia reactiva, regulación de tensión, reducción de potencia activa (derating) y corrientes circulantes.
- Desarrollar un modelo experimental de laboratorio con Microformers para comparar los resultados obtenidos de la red experimental contra simulaciones.
- Entregar un conjunto de recomendaciones para futuras redes construidas con Microformers.

1.3. Estructura de la memoria

La estructura del presente documento se especifica a continuación.

- **Capítulo 1 Introducción:** Se presenta descripción del trabajo de título, donde se define la motivación, los objetivos generales y objetivos específicos.
- **Capítulo 2 Marco Teórico:** Se presenta la teoría del transformador de poder, estado del arte del Microformer, sistemas de distribución, métodos de regulación de tensión y redes de distribución modelos.
- **Capítulo 3 Implementación:** En este capítulo se detalla la selección y construcción de Microformers. Se diseña y construye la red experimental, además de implementar dicha red en un software de cálculo de sistemas de potencia.
- **Capítulo 4 Análisis y resultados:** Se muestran y analizan los resultados de la implementación de la metodología definida en el capítulo 3, usando una red modelo de distribución de la IEEE y la red experimental propuesta. Con esta última se estudia el comportamiento y los efectos del Microformer en distintos casos de interés abarcando regulación de tensión tanto aislado como conectado a la red eléctrica.
- **Capítulo 5 Conclusiones:** En este capítulo se mostrarán las conclusiones del trabajo, recomendaciones para la inserción del Microformer en redes de distribución y una propuesta de trabajo futuro a partir de lo investigado en esta memoria.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Transformador de Poder

2.1.1 Introducción

Actualmente, la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica se hace mayoritariamente en corriente alterna. De ahí la importancia del transformador de poder, que permite operar el sistema eléctrico en distintos niveles de tensión con el fin de disminuir las pérdidas en transmisión de energía desde unidades generadoras hasta centros de consumo. También se encarga en algunos casos, como función secundaria, de la regulación de tensión y de flujos de potencia. [2]

Los transformadores son una parte fundamental de los sistemas eléctricos en general. Particularmente, los transformadores de distribución tienen una gran demanda a nivel comercial por su pequeña capacidad y la gran cantidad de transformadores instalados. A modo de comparación, para un transformador de potencia de 300 MVA se requieren aproximadamente cuatro mil transformadores de 75 kVA. [3]

2.1.2 Transformador ideal de dos enrollados

Un transformador básico está compuesto por dos enrollados enlazados por un flujo magnético.

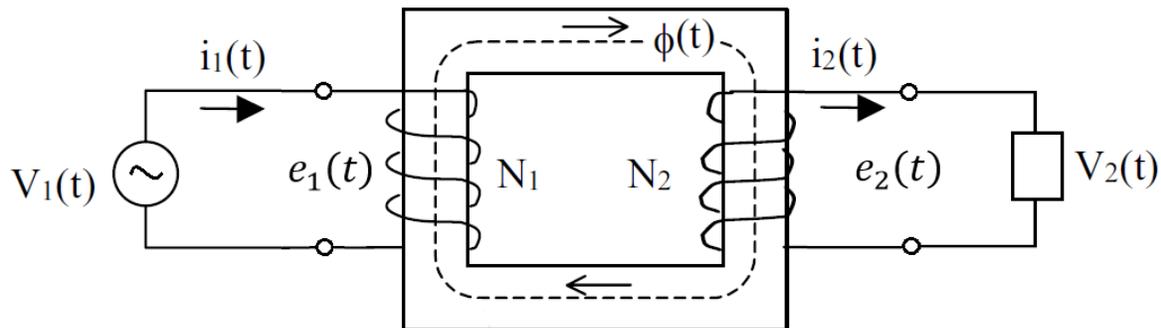


Figura 2.1: Principio de funcionamiento del transformador de dos enrollados

Si uno de los enrollados (enrollado primario) se conecta a una fuente de alimentación sinusoidal $v_1(t)$ circulará por él una corriente $i_1(t)$ que a su vez genera un flujo magnético cuya magnitud depende del voltaje aplicado y el número de vueltas N_1 del enrollado. Parte de este flujo se enlaza en el otro enrollado (secundario), donde se induce una tensión $v_2(t)$ dependiente del número de vueltas N_2 de la espira correspondiente. Así, variando el

número de vueltas entre ambos enrollados se logra una relación entre las tensiones de entrada y salida o razón de transformación "a". [4]

Para que la transformación de tensión sea efectiva sólo se requiere que los flujos alternos enlacen ambos enrollados. Para que este efecto tenga un resultado más satisfactorio se usa generalmente un núcleo de hierro obteniéndose, así, un circuito magnético para disminuir las pérdidas por flujos no enlazados. [4]

El caso de un transformador ideal, donde no existen pérdidas de potencia activa ni reactiva, está sujeto a las siguientes suposiciones: [5]

- Permeabilidad del núcleo infinita (reluctancia despreciable).
- No hay flujos de fuga, es decir, el flujo es enlazado en su totalidad por ambos enrollados.
- No hay pérdidas Joule en los enrollados (resistencia nula)
- No hay pérdidas de potencia en el núcleo.

2.1.2.1 Relación de tensiones

Si el primario se alimenta desde una fuente sinusoidal $v_1(t)$, la fuerza electromotriz (f.e.m.) del primario $e_1(t)$ será igual a $v_1(t)$ al no haber flujos de fuga ni resistencia del enrollado, donde se cumple que:

$$v_1(t) \approx e_1(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Luego, como la tensión es sinusoidal el flujo también lo es:

$$\phi = \phi_{m\acute{a}x} \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

Combinando ambas ecuaciones:

$$v_1(t) \approx e_1(t) = \omega \cdot N_1 \cdot \phi_{m\acute{a}x} \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

Con:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

Siendo f la frecuencia de la fuente de alimentación.

Así, el valor efectivo de la tensión, V_1 o E_1 , está relacionado con el flujo máximo por:

$$V_1 \approx E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 f \phi_{m\acute{a}x} \approx 4,44 \cdot N_1 f \phi_{m\acute{a}x} \quad (2.5)$$

Se debe hacer notar que, al aplicar una tensión V_1 al primario (valor efectivo), se establece un flujo en el núcleo cuyo valor máximo es independiente de la corriente que pueda circular por los circuitos y sólo depende de la razón entre la magnitud de la tensión y la frecuencia:

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{1}{4,44 N_1} \cdot \frac{V_1}{f} \quad (2.6)$$

Si se considera que " A_N " es el área transversal neta del núcleo, la relación (2.5) se puede escribir también como:

$$V_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot N_1 f B_{m\acute{a}x} A_N \quad (2.7)$$

Donde $B_{m\acute{a}x}$ es la densidad de flujo máximo en el núcleo.

En el secundario, como todo el flujo ϕ es enlazado por las N_2 vueltas de dicho enrollado, se cumplirá que:

$$V_2 \approx E_2 = 4,44 \cdot N_2 f \phi_{m\acute{a}x} \quad (2.8)$$

Combinando las ecuaciones (2.5) y (2.8) se encuentra que para los valores efectivos (o fasores) en un transformador ideal se cumple que:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.9)$$

2.1.2.2 Relación de corrientes

En la Figura 2.2 se muestra el circuito magnético equivalente de la figura 2.1 cuando circula una corriente i_1 por el primario e i_2 por el secundario; \mathcal{R} es la reluctancia magnética del núcleo, y ambas f.e.m $N_1 i_1$ y $N_2 i_2$ son opuestas de acuerdo al sentido de las corrientes indicado en la figura 2.1.

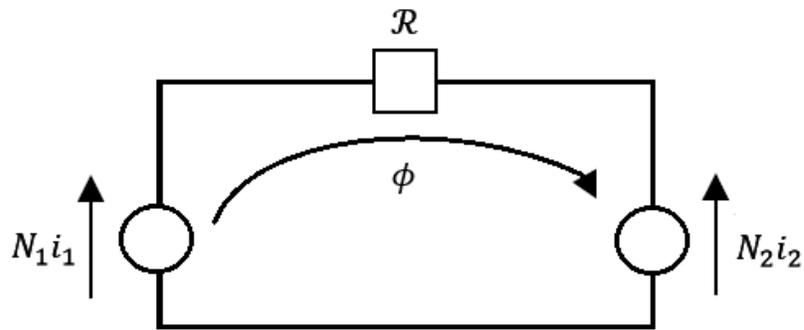


Figura 2.2: Circuito magnético equivalente

Se cumple que:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R} \cdot \phi \quad (2.10)$$

Como $\mathcal{R} \rightarrow 0$ y siendo $\phi \neq 0$ se tiene que:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (2.11)$$

Luego:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.12)$$

2.1.3 Transformador real

En la práctica, el transformador presenta un comportamiento distinto al descrito anteriormente, donde los supuestos considerados en la parte anterior no se cumplen debido a la presencia de pérdidas de potencias activas y reactivas.

2.1.3.1 Flujo mutuo y flujos de fuga

Cuando circula una corriente i_1 por el enrollado primario, éste queda enlazado por un flujo debido a la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) $N_1 i_1$. La parte del flujo que es enlazado tanto por el enrollado primario como por el secundario se denominará ϕ_{m1} (flujo mutuo producido por la corriente i_1), y la parte del flujo que sólo es enlazada por el enrollado primario se designará ϕ_{f1} (flujo de fuga).

Entonces ϕ_{m1} y ϕ_{f1} están dados por:

$$\phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{m1}} \quad (2.13)$$

$$\phi_{f1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{f1}} \quad (2.14)$$

Donde \mathcal{R}_{m1} y \mathcal{R}_{f1} es la reluctancia del circuito magnético recorrido por el flujo ϕ_{m1} y ϕ_{f1} respectivamente.

Análogamente, cuando circula una corriente i_2 por el enrollado secundario se tiene un flujo ϕ_{m2} que es enlazado por ambos enrollados y un flujo de fuga ϕ_{f2} que es enlazado sólo por el secundario.

$$\phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_{m2}} \quad (2.15)$$

$$\phi_{f2} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_{f2}} \quad (2.16)$$

Como ϕ_{m1} y ϕ_{m2} tienen el mismo circuito magnético entonces la reluctancia asociada a ambos flujos es la misma ($\mathcal{R}_m = \mathcal{R}_{m1} = \mathcal{R}_{m2}$).

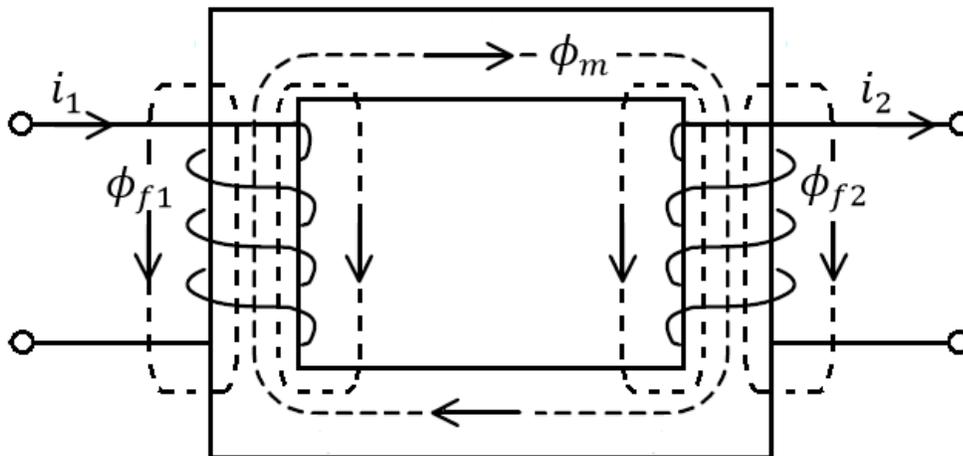


Figura 2.3: Flujo mutuo y flujos de fuga

Si ahora circulan simultáneamente i_1 por el primario e i_2 por el secundario, se tendrá (Figura 2.3) un flujo ϕ_m común a ambos enrollados:

$$\phi_m = \frac{1}{\mathcal{R}_m} (N_1 i_1 + N_2 i_2) = \phi_{m1} + \phi_{m2} \quad (2.17)$$

Luego, los flujos totales ϕ_1 y ϕ_2 que circulan por ambos enrollados es:

$$\phi_1 = \phi_{f1} + \phi_{m1} - \phi_{m2} = \phi_m + \phi_{f1} \quad (2.18)$$

$$\phi_2 = \phi_{m1} - \phi_{f2} - \phi_{m2} = \phi_m - \phi_{f2} \quad (2.19)$$

Ahora, las tensiones en los terminales serán:

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi_{f1}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.20)$$

$$v_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\phi_{f2}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.21)$$

De la ecuación (2.1) se tiene que los términos $N_1 \frac{d\phi_m}{dt}$ y $N_2 \frac{d\phi_m}{dt}$ corresponden justamente a las f.e.m. e_1 y e_2 consideradas en el caso del transformador ideal. Luego, la ecuación (2.1) queda:

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_{f1}}{dt} + e_1 \quad (2.22)$$

$$v_1 = v_{x1+e1}$$

Esta ecuación indica que existe una tensión v_{x1} que adelanta al flujo en 90° . Luego, se puede definir una inductancia de fuga:

$$L_1 = N_1 \frac{\phi_{f1}}{di_1} \quad (2.23)$$

Entonces, la ecuación (2.22) se puede reescribir como:

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + e_1 \quad (2.24)$$

v_{x1} es una caída de tensión en la reactancia inductiva, que se denomina reactancia de fuga del primario, dada por:

$$X_1 = 2\pi \cdot f \cdot L_1 \quad (2.25)$$

Fasorialmente, la ecuación (2.23) es:

$$\dot{V}_1 = jX_1 \dot{I}_1 + \dot{E}_1 \quad (2.26)$$

Análogamente, para el secundario se tiene:

$$\dot{V}_2 = -jX_2 \dot{I}_2 + \dot{E}_2 \quad (2.27)$$

Considerando este efecto, el circuito equivalente ya no serían simplemente dos enrollados, si no que se agregarían dos reactancias X_1 y X_2 en serie a cada enrollado respectivo. La Figura 2.4 muestra el circuito equivalente del transformador al incluir las pérdidas por corrientes de fuga.

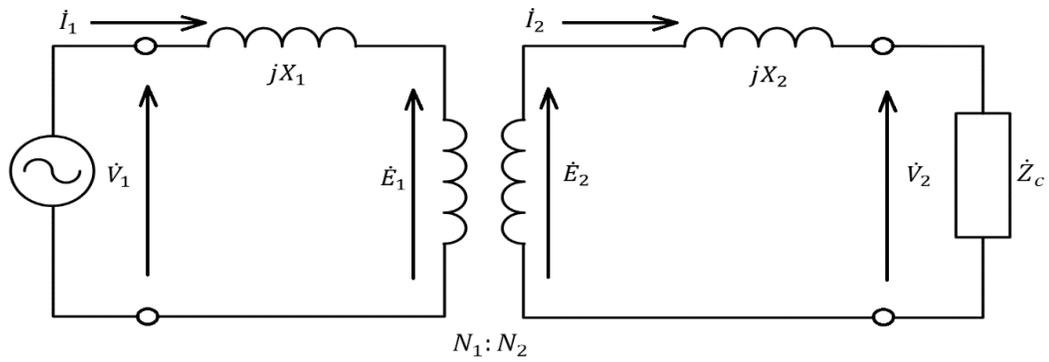


Figura 2.4: Circuito equivalente incluyendo el efecto de flujos de fuga

2.1.3.2 Resistencia en los enrollados

Si se consideran las resistencias r_1 y r_2 por el enrollado primario y secundario respectivamente, habrá una caída de tensión en ellas. Luego, la ecuación (2.26) se puede escribir como:

$$\dot{V}_1 = jX_1 \dot{I}_1 + \dot{I}_1 r_1 + \dot{E}_1 \quad (2.28)$$

Para el secundario, la ecuación 2.26 queda:

$$\dot{E}_2 = jX_2 \dot{I}_2 + \dot{I}_2 r_2 + \dot{V}_2 \quad (2.29)$$

Con esto, el circuito equivalente será el mostrado en la Figura 2.5.

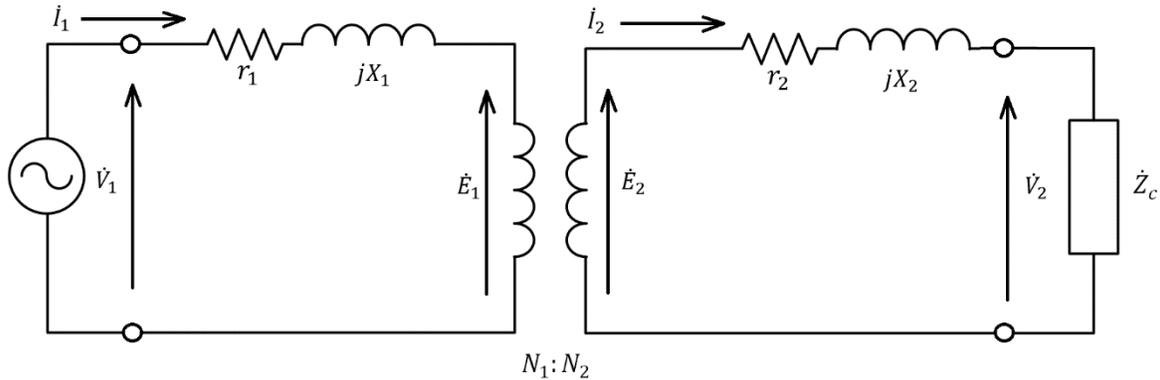


Figura 2.5: Circuito equivalente incluyendo resistencias de los enrollados

2.1.3.3 Permeabilidad magnética finita

En un transformador real el núcleo tiene una reluctancia $\mathcal{R} \neq 0$. Sin embargo, se supondrá que la permeancia magnética μ es constante.

Como $\mathcal{R} \neq 0$ la ecuación (2.9) queda:

$$\phi_m = \frac{1}{\mathcal{R}_m} (N_1 i_1 - N_2 i_2) \quad (2.30)$$

Si se define una inductancia mutua del circuito 1 (L_{m1}) por:

$$L_{m1} = \frac{N_1 \phi_{m1}}{i_1} = \frac{N_1}{i_1} \left(\frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_m} \right) = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_m} \quad (2.31)$$

Despejando \mathcal{R}_m de la ecuación (2.31) y reemplazándolo en (2.30) se tiene:

$$\phi_m = \frac{L_{m1}}{N_1} \left(i_1 - \frac{N_1}{N_2} i_2 \right) \quad (2.32)$$

Como se asume que no existe saturación del núcleo, la inductancia mutua L_{m1} será constante y se cumplirá instantáneamente que:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_{m1}}{dt} = L_{m1} \frac{d}{dt} \left(i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \quad (2.33)$$

Análogamente para el enrollado secundario:

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_{m2}}{dt} = L_{m2} \frac{d}{dt} \left(i_2 - \frac{N_1}{N_2} i_1 \right) \quad (2.34)$$

Por lo que la fuerza electromotriz e_1 es igual a la que produce una inductancia L_m por la que circula una corriente, denominada “corriente magnetizante”, igual a:

$$i_m = i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (2.35)$$

Luego, el circuito equivalente agregando la ligazón magnética entre las fuerzas electromotrices \dot{E}_1 y \dot{E}_2 queda representado en la Figura 2.6.

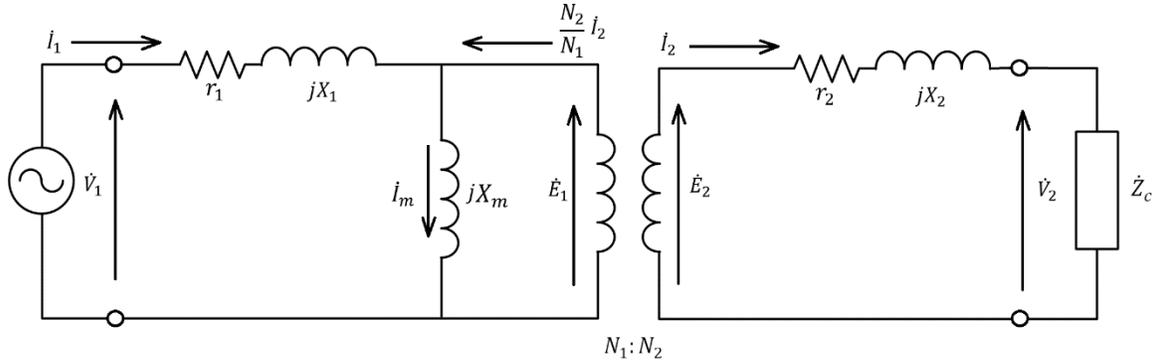


Figura 2.6: Circuito equivalente incluyendo reactancia de magnetización

2.1.3.4 Pérdidas en el hierro

En el análisis anterior se ha supuesto que el núcleo del transformador no se encuentra saturado ni tiene pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault. Si se considera el transformador en vacío ($i_1 = i_0$), se puede analizar la forma de onda de la corriente i_0 , para un flujo ϕ sinusoidal, como lo muestra la Figura 2.7:

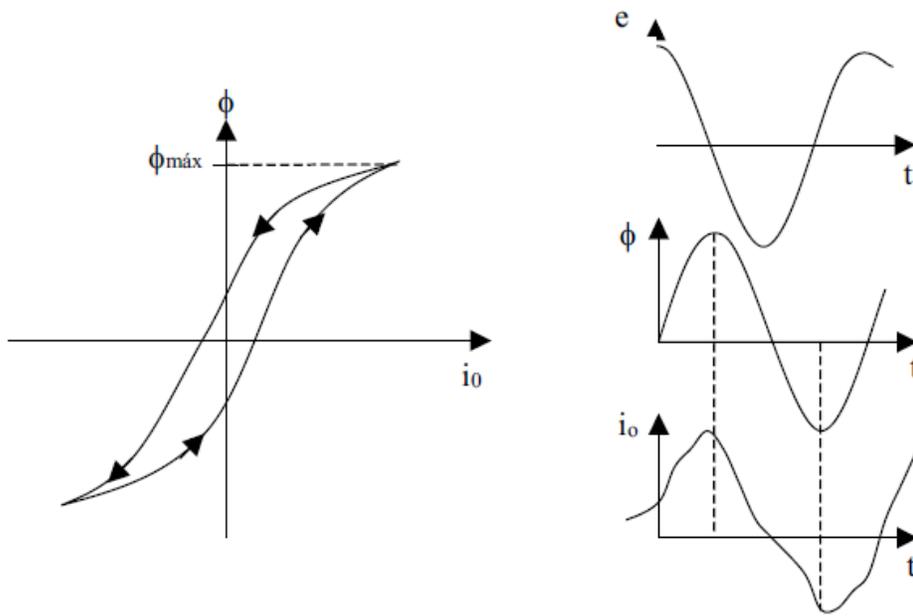


Figura 2.7: Corriente en vacío para núcleo con pérdidas [5]

Se observa que \dot{I}_0 está desfasada (en adelante) en un pequeño ángulo (Ψ_p) con respecto al flujo. En un diagrama fasor la situación es la de la Figura 2.8.

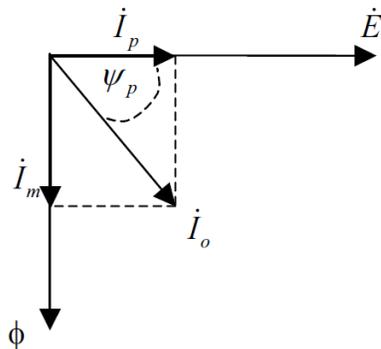


Figura 2.8: Representación fasorial de corriente en vacío para núcleo con pérdidas [5]

Luego, \dot{I}_0 puede descomponerse en una corriente \dot{I}_p en fase con \dot{E}_1 , y una corriente \dot{I}_m en fase con ϕ denominadas corriente de pérdidas en el núcleo y corriente de magnetización respectivamente.

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_p + \dot{I}_m \quad (2.36)$$

El circuito equivalente debe modificarse de manera que \dot{I}_0 se descomponga en una corriente por una inductancia (x_m), y una corriente por una resistencia (r_p).

2.1.3.5 Modelo exacto del transformador

La Figura 2.9 muestra el circuito equivalente exacto del transformador al incluir los efectos antes descritos. Las tensiones E_1 y E_2 se comportan como en un transformador ideal manteniéndose las relaciones (2.1) y (2.2).

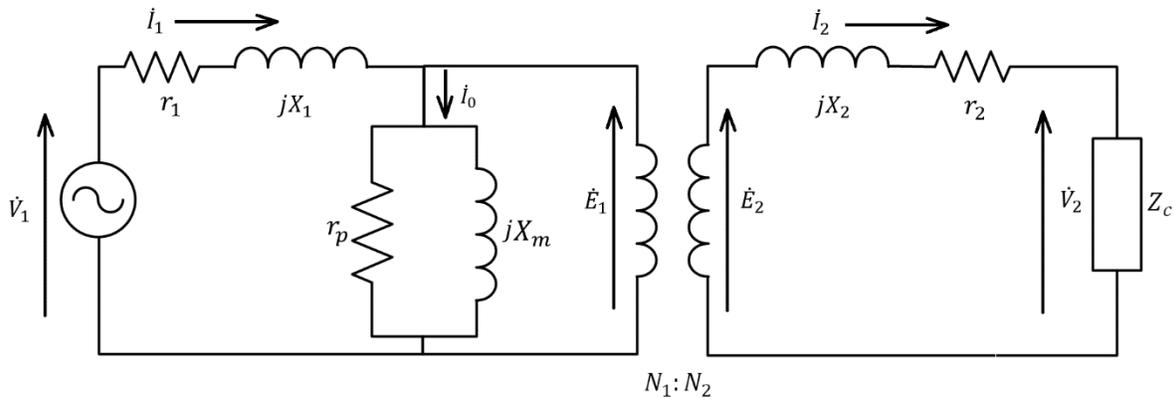


Figura 2.9: Circuito equivalente exacto del transformador real

2.1.4 Rendimiento

El rendimiento de un transformador puede determinarse, para una carga dada, a través de la expresión:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos(\phi)}{V_2 I_2 \cos(\phi) + \text{pérdidas}} \quad (2.37)$$

Los valores V_2 , I_2 y $\cos(\phi)$ son datos y por lo tanto rigurosamente exactos. Los errores de medidas afectarán solamente a las pérdidas que son pequeñas [4].

2.1.5 Regulación de tensión

Se define como regulación de un transformador la variación que experimenta la tensión del secundario al variar una carga, de determinado factor de potencia, entre su valor nominal y cero, manteniendo la tensión en el primario constante [5].

La regulación se define como un porcentaje respecto del valor de la tensión nominal del secundario, de acuerdo a la expresión:

$$Reg = \frac{\frac{V_1}{a} - V_2}{V_2} \cdot 100 \quad (2.38)$$

2.1.6 Ensayos a transformadores

2.1.6.1 Prueba de razón de transformación

La razón de transformación entre el enrollado primario y secundario puede obtenerse por medio de dos métodos, dependiendo del tipo de transformador y de las facilidades existentes [4].

Método del voltímetro

Consiste en aplicar una tensión alterna de magnitud conocida en un enrollado y medir la tensión inducida en circuito abierto en el otro enrollado, las medidas deben realizarse en ambos enrollados simultáneamente. Luego, las lecturas de los instrumentos indicará la razón de transformación [4].

Una segunda prueba se puede realizar intercambiando instrumentos, luego el promedio de ambas mediciones es utilizado para compensar el error de los instrumentos.

Método de comparación

Un método más exacto es el que se realiza en pruebas de fábrica, consistente en comparar la tensión del transformador con un transformador patrón calibrado. Ambos transformadores deben ser conectados en paralelo aplicando tensión a sus enrollados de alta tensión, mientras que los de baja se encuentran conectados a un detector sensible, cuya indicación se lleva a cero ajustando la razón del transformador patrón.

2.1.6.2 Prueba de polaridad

Existen varios métodos para determinar la polaridad de un transformador, pero sin duda el método más sencillo es el de corriente continua [4].

El método consiste en conectar una fuente de tensión continua al enrollado primario y medir con un voltímetro análogo de corriente continua en el enrollado secundario. Al conectar la fuente se producirá un flujo transiente que inducirá en el enrollado de baja una f.e.m. también transiente.

Si la polaridad del transformador es la indicada en la figura (sustractiva), entonces la f.e.m. inducida en el secundario será tal que X_1 se encuentre a potencial positivo con respecto a X_2 . Conectando el borne positivo del voltímetro a X_1 y el negativo a X_2 , su aguja se moverá en sentido positivo para luego volver a cero. Cuando se desconecte la fuente, se inducirá una f.e.m. en sentido contrario.

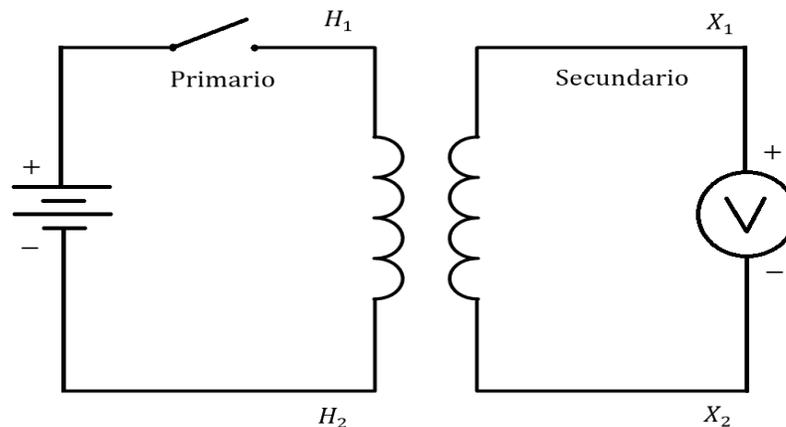


Figura 2.10: Prueba de polaridad con corriente continua

2.1.6.3 Prueba en circuito abierto

La prueba denominada en “circuito abierto” permite determinar las constantes de la rama de excitación del circuito equivalente y las pérdidas en el hierro.

Con el lado de alta tensión abierto, se alimenta a tensión nominal en el lado de baja. En estas circunstancias, circulará una corriente de excitación por dicho enrollado. Este ensayo debe realizarse con una tensión sinusoidal [4], pues la forma de onda afecta el valor de las pérdidas en el hierro.

En la Figura 2.11 se muestra el circuito y los instrumentos a utilizar para este ensayo.

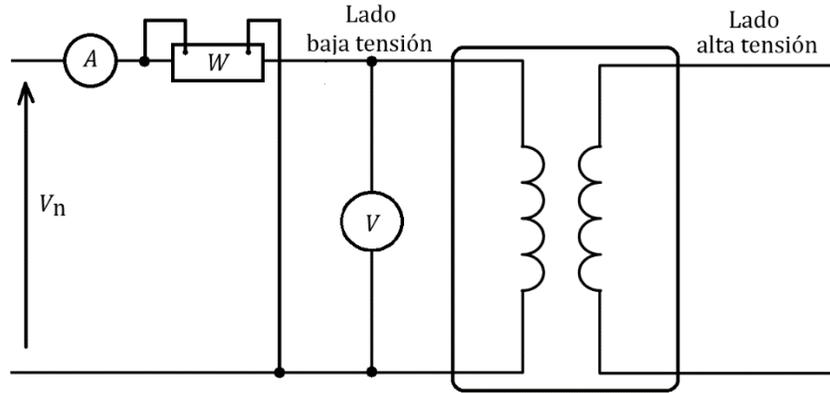


Figura 2.11: Prueba de circuito abierto

La caída de tensión en la impedancia de fuga del primario producida por la corriente de excitación es totalmente despreciable. Por ende, la tensión aplicada V_n será prácticamente igual a la f.e.m. E_1 inducida por el flujo resultante. Así mismo, las pérdidas en el cobre producidas por esta corriente serán despreciables de manera que la potencia P_1 absorbida será prácticamente igual a las pérdidas en el hierro P_0 . Denominando por I_0 la corriente de excitación, la impedancia de la rama de excitación Z_0 , la resistencia R_0 y la reactancia X_0 quedarán dadas por:

$$Z_0 = \frac{V_n}{I_0} \quad (2.39)$$

$$R_0 = \frac{V_1^2}{P_1} \quad (2.40)$$

$$X_0 = \frac{1}{\sqrt{Z_0^{-1} - R_0^{-1}}} \quad (2.41)$$

Los valores obtenidos quedan, evidentemente, referidos al lado de baja tensión.

2.1.6.4 Prueba en cortocircuito

La prueba en cortocircuito consiste en medir tensión aplicada, corriente y potencia en el lado de alta tensión de un transformador estando el lado de baja tensión cortocircuitado.

Con el lado de baja tensión cortocircuitado, se aplica al lado de alta tensión una tensión reducida de magnitud tal que circule la corriente nominal.

Designando por V_{cc} la tensión aplicada, I_N la corriente nominal que circula por los enrollados, P_{cc} la potencia consumida, Z_{cc} la impedancia de cortocircuito, R_{cc} y X_{cc} sus componentes de resistencia y reactancia referida al lado de alta tensión, se tendrá:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_N} \quad (2.42)$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_N^2} \quad (2.43)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (2.44)$$

La Figura 2.12 muestra la prueba en cortocircuito con los instrumentos de medida respectivos. La tensión inducida en el secundario por el flujo resultante es igual a la caída de tensión en la impedancia de fuga del secundario. Con corriente nominal esta tensión es sólo del orden de 1 a 6% de la tensión nominal. El flujo resultante es por consiguiente muy pequeño; la corriente de excitación y las pérdidas en el hierro serán entonces despreciables en la mayoría de los transformadores [4].

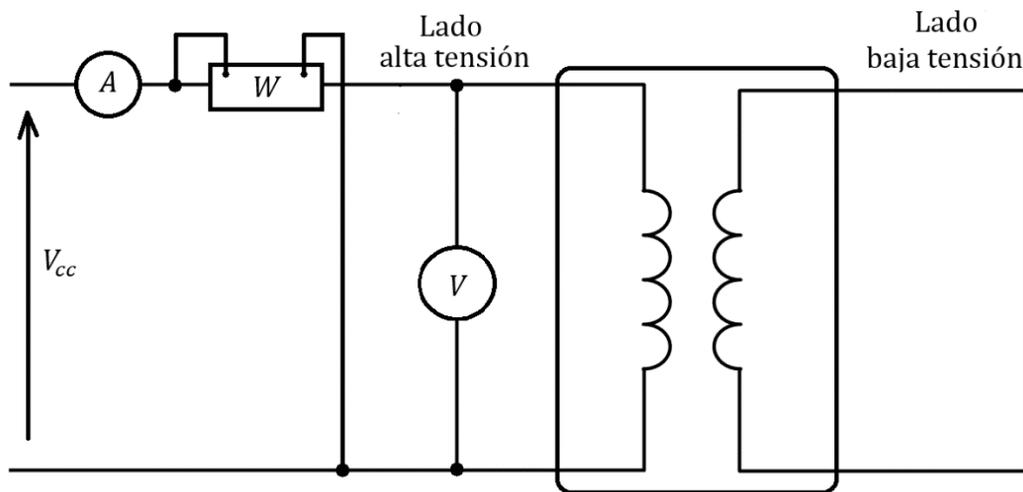


Figura 2.12: Prueba en cortocircuito

2.1.7 Conexión en paralelo de transformadores monofásicos

Para aumentar la potencia transferida en un sistema monofásico, es posible emplear dos o más transformadores conectados en paralelo. Sin embargo, la potencia total del banco en paralelo no es necesariamente la simple suma de las potencias de cada transformador. Por otra parte, es necesario tener en cuenta una serie de precauciones para evitar problemas en la operación del conjunto. [5]

Cuando se conectan transformadores en paralelo con tensiones inducidas distintas, es decir, con diferente razón de transformación, habrá una corriente de circulación en circuito abierto entre los transformadores, la que puede ser elevada si existe mucha diferencia entre las razones de transformación. También, puede producir el mismo efecto si los transformadores tienen polaridad diferente.

Por ello, las condiciones para eliminar la corriente de circulación son razones de transformación y polaridades iguales [5]. Sin embargo, al tener esta consideración no se asegura un igual comportamiento de ambos transformadores, ya que la corriente consumida por una carga dada se reparte entre ambos transformadores de forma inversa a sus impedancias equivalentes. Luego, si las impedancias equivalentes de ambos transformadores son distintas un transformador quedará subcargado o sobrecargado si ambos tienen igual potencia nominal.

2.2 Microformer

2.2.1 Introducción

El Microformer es un dispositivo eléctrico que tiene como principal componente un transformador de horno microondas (MOT, por sus siglas en inglés) el que es acondicionado para ser utilizado en sistemas eléctricos de media tensión. El Microformer es una solución atractiva de bajo costo para pequeños sistemas eléctricos de distribución que puede permitir tanto la electrificación de zonas rurales como también la interconexión de pequeñas fuentes de generación distribuida con la red y/o consumos locales. Además, permite y fomenta el reciclaje de residuos electrónicos. [6]

2.2.2 El transformador de horno microondas (MOT)

Un MOT es un transformador de tipo seco de acero laminado con potencia nominal cercana a 1kW, posee un enrollado primario con tensión nominal de 220V a 50Hz, un enrollado secundario de 2,4kV en circuito abierto y un tercer enrollado de 3V para alimentar componentes electrónicos del horno [7]. Adicionalmente, posee unas barras magnéticas entre los enrollados primario y secundario para saturar el núcleo en caso de cortocircuito [1]. La Figura 2.13 muestra un MOT con sus componentes.

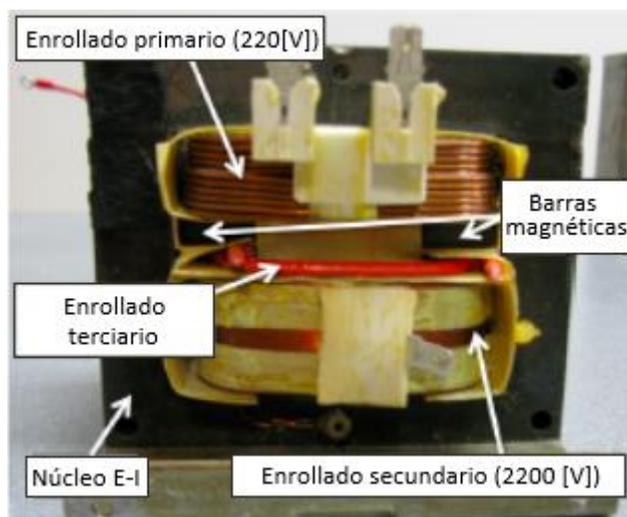


Figura 2.13: Unidad MOT típica [1]

2.2.3 Modificación de los MOT's

Para mejorar la respuesta electromagnética del MOT es necesario realizarle ciertas mejoras. De acuerdo al manual de construcción [8] se debe extraer las barras magnéticas y añadir espiras al enrollado de baja a cada transformador.

Para calcular las vueltas que se deben añadir al enrollado primario se debe definir la tensión que se desea obtener en alta, o en otras palabras, la razón de transformación deseada. La figura 2.14 muestra un grupo de transformadores con razones de

transformaciones a_i diferentes, las que se alimentan con una misma tensión pero se inducen tensiones V_2^i particulares para cada transformador.

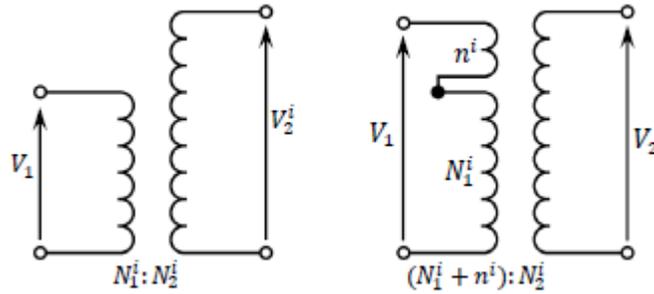


Figura 2.14: Adición de espiras a enrollado primario [7].

Añadiendo n^i espiras adicionales a las N_1^i vueltas del enrollado primario se busca obtener una tensión secundaria V_2 común para todos los transformadores. Además, la razón de transformación también será única.

Para determinar el número n^i a añadir a cada transformador se tiene que [7]:

$$n^i = N_1^i \cdot \left(\frac{a_i}{a} - 1 \right) \quad (2.45)$$

con a_i la razón de transformación del transformador sin modificar:

$$a_i = \frac{N_2^i}{N_1^i} \quad (2.46)$$

Los número de vueltas N_1^i y N_2^i se obtienen estimando las vueltas de cada enrollado. Para ello se debe enrollar un conductor en torno a la pierna central del núcleo (ocupando los espacios dejados por las barras magnéticas), de tal manera de formar una bobina exploratoria con número de vueltas conocido. Al energizar el enrollado primario con una tensión conocida se inducirá una tensión en la bobina exploratoria, utilizando la ecuación (2.9) se puede determinar el número de vueltas del enrollado primario y del secundario.

2.2.4 Resultados de estudios previos del Microformer

A continuación, se muestran los resultados de pruebas eléctricas a un grupo de MOT realizadas por el equipo de la Universidad de Wisconsin [1] y las pruebas realizadas en la memoria de Manuel Gatica [7]. En ambos casos se extrajo el enrollado de 3V.

La Tabla 2.1 muestra el promedio de los valores de los parámetros de 13 transformadores de distintos modelos y manufactura de hornos microondas escogidos por el equipo de la Universidad de Wisconsin. Estos MOT tienen un alta corriente de excitación alcanzando un tercio de la corriente nominal. Además, la regulación de tensión depende principalmente de la impedancia serie del MOT, la que produce una caída de tensión cercana al 10% a potencia nominal.

Tabla 2.1: Parámetros del MOT norteamericano referido al primario.

	$r_1, r_2' [pu]$	$x_1, x_2' [pu]$	$R_m [pu]$	$X_m [pu]$
Valor promedio	0,03	0,21	25,8	3
Desviación estándar	0,003	0,084	6,23	1,34

La reactancia de magnetización del MOT es baja para un transformador de distribución lo que origina una alta corriente de magnetización, y por ende, una baja eficiencia. Además, las reactancias de fuga son altas en comparación con un transformador de distribución las que se pueden disminuir removiendo las barras magnéticas extras.

La Tabla 2.1 muestra los valores de los parámetros al extraer las barras magnéticas, donde la reactancia serie reduce notablemente su valor, y de esta forma, aumenta la eficiencia del transformador.

Tabla 2.2: Parámetros del MOT norteamericano referido al primario sin barras magnéticas.

	$r_1, r_2' [pu]$	$x_1, x_2' [pu]$	$R_m [pu]$	$X_m [pu]$
Valor promedio	0,031	0,066	23,0	5,56
Desviación estándar	0,004	0,018	6,21	1,12

La saturación del núcleo y la alta corriente de magnetización pueden ser mitigadas adicionando vueltas al enrollado primario, logrando disminuir la densidad de flujo magnético.

Los resultados obtenidos en la memoria de Manuel Gatica son mostrados en la Tabla 2.3 donde se llega a la misma conclusión anterior, donde la extracción de las barras magnéticas aumenta la eficiencia del MOT al reducir la reactancia de fuga, y se disminuye la corriente de magnetización junto a la saturación del núcleo al aumentar el número de vueltas del enrollado primario.

Tabla 2.3: Parámetros del MOT chileno referido al primario con distintas modificaciones.

		$r_1, r_2' [pu]$	$x_1, x_2' [pu]$	$R_m [pu]$	$X_m [pu]$
MOT sin modificación	Valor promedio	0,066	0,398	24,78	2,32
	Desviación estándar	0,15	0,157	0,143	0,088
MOT sin barras magnéticas	Valor promedio	0,061	0,121	20,92	1,81
	Desviación estándar	0,136	0,141	0,124	0,105
MOT con vueltas añadidas	Valor promedio	0,072	0,136	30,62	4,28
	Desviación estándar	0,076	0,303	0,177	0,056

Si bien al añadir espiras al enrollado primario disminuye positivamente la corriente de excitación compromete la tensión del lado secundario disminuyéndola al modificar la razón de transformación. La disminución de la corriente de excitación propone una mejor regulación y eficiencia. Sin embargo, una tensión inferior puede significar una corriente mayor en el enrollado secundario para alimentar un mismo consumo [7].

Por otra parte, el aumento de la resistencia del enrollado primario repercute en un aumento de las pérdidas de carga y en la impedancia serie del transformador. La consiguiente alza de temperatura puede ser perjudicial para la seguridad del equipo y merma su vida útil.

El estudio de Manuel Gatica entrega las siguientes recomendaciones [7]:

1. Reducir la corriente nominal del Microformer: el nuevo valor de la corriente debe ser tal que las temperaturas resultantes de la prueba de calentamiento estén dentro de los límites establecidos por el estándar internacional y la norma chilena.
2. Estudiar las condiciones de operación a las que se someterá un Microformer antes de la instalación. Luego, conectar el transformador sólo si estas condiciones son menos exigentes que la prueba de calentamiento. Adicionalmente, se recomienda implementar un interruptor térmico que saque de operación al dispositivo cuando alcance temperatura fuera de los límites establecidos.
3. Situar los Microformers en zonas aisladas, donde no puedan acceder personas que puedan sufrir daños ante una falla de equipo.

2.2.5 Adaptación del MOT como transformador de distribución

Con las características eléctricas mencionadas en 2.2.3 se puede desarrollar un contenedor adecuado para el MOT. Con el fin de mantener el espíritu de reciclaje, se utiliza un tarro de pintura como contenedor del MOT, se instala un soporte aislante y se puede utilizar bornes aislantes de PVC (figura 2.15).

El contenedor puede ser llenado con un aceite dieléctrico pero en particular se debe tener cuidado con el tipo de aceite utilizado, debido a los efectos sobre el aislamiento de los cables. El aceite es esencial para el enfriamiento del MOT, ya que originalmente no está diseñado para trabajar continuamente. [1]

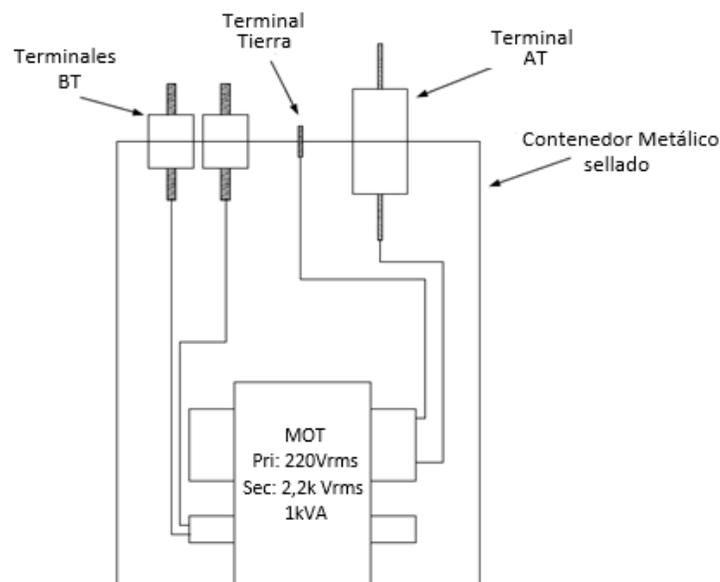


Figura 2.15: Esquema del contenedor del MOT hecho con tarro de pintura y bornes de PVC [1].

2.3 Sistemas de distribución

Los sistemas de distribución entregan la potencia y energía requeridas por varias redes de usuarios, y que estrictamente conforman el primer escalón de los sistemas eléctricos de potencia [2].

Las redes de distribución presentan atributos particulares que los distinguen de los sistemas de transmisión. Entre éstas se pueden destacar [9]:

- Topologías radiales en su mayoría.
- Razón R/X alta (resistencia de línea comparable con su reactancia).
- Múltiples conexiones (monofásicas, bifásicas, etc.).
- Cargas de distinta naturaleza.
- Líneas sin transposiciones.
- Cargas distribuidas.

2.3.1 Características de los sistemas de distribución

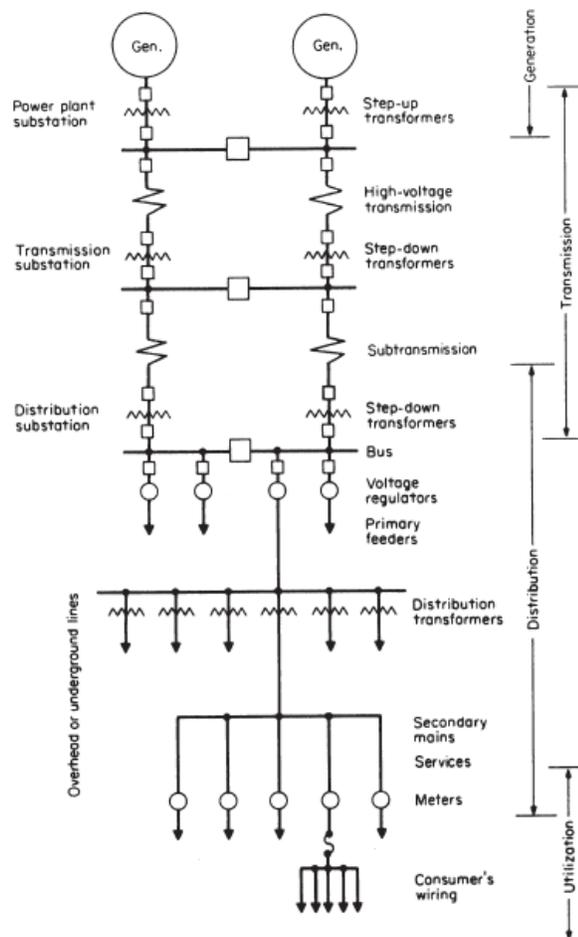


Figura 2.16: Sistema eléctrico típico donde se muestra las divisiones operacionales [10].

La Figura 2.16 muestra un sistema eléctrico de potencia típico, donde se distinguen los sistemas de generación, transmisión y, por último, los sistemas de distribución que inicia con los alimentadores primarios que corresponden a subestaciones de bajada para luego llegar a los transformadores de distribución que alimentan a distintos tipos de consumidores finales.

2.3.2 Tipos de sistema de distribución

Se puede clasificar de distintas maneras los sistemas de distribución, ya sea por el tipo de topología, por el tipo de sistema eléctrico (DC o AC, monofásico o polifásica, etc), por el tipo de consumos (industriales, comercial o residencial) o por tipo de construcción (aéreo o subterráneo). Sin embargo, la clasificación más importante es por el tipo de alimentación.

2.3.2.1 Sistema de distribución primario

Son sistemas que transmiten algunos MW de potencia, debido que apoyan a redes de distribución secundaria, y que por ello operan con tensiones superiores, del orden los 10kV a los 15kV. En sistemas rurales se da preferencia a tensiones mayores, como 23kV e incluso 33kV. Suelen ser radiales, aunque en los países industrializados pueden estructurarse en anillos [2].

2.3.2.2 Sistema de distribución secundario

Operan a bajas tensiones las que corresponden a la tensión del usuario final [2] y, al igual que los sistemas primarios, se debe considerar fiabilidad de servicio y regulación de tensión. El sistema secundario puede ser de los cuatro siguientes tipos [10]:

1. Un sólo transformador por cada consumo.
2. Una red eléctrica secundaria común asociada a un transformador que abastece a un grupo de consumidores.
3. Una red eléctrica continua secundaria con dos o más transformadores, conectados al mismo alimentador primario, donde se abastece la demanda de un grupo de consumidores. A veces se conoce como banco de transformadores secundarios, este tipo de red aumenta la confiabilidad del servicio.
4. Una red eléctrica continua secundaria con dos o más transformadores, que a su vez está conectada a dos o más alimentadores primarios. Donde una gran cantidad de consumidores son abastecidos.

2.3.3 Sistema de distribución rural

Los sistemas de distribución rurales se caracterizan por tener consumos aislados en mayor medida, debido a una baja densidad poblacional, donde los consumos están apartados unos de otros, luego es prácticamente imposible tener una red eléctrica secundaria.

En este tipo de sistemas, el costo en transformadores es muy alto y la suma de pérdidas de potencia por cada unidad puede ser mayor que las de un transformador que abastece a un grupo de consumos asociados a una red eléctrica secundaria. Así también, la caída de tensión puede ser significativa en una red secundaria, donde los usuarios más lejanos al transformador pueden tener una calidad de servicio poco aceptable. Luego, el tipo de

sistema de distribución más aceptable para zonas rurales es tener un transformador por cada consumidor [10].

2.4 Regulación de tensión

El sistema de transmisión suele enfrentar dificultades para transmitir potencia reactiva. Por lo tanto, el sistema de distribución debiera autocompensar sus reactivos. La tensión media de las redes de distribución se mantiene fundamentalmente con ayuda de los transformadores con derivación [2]. Sin embargo, en zonas rurales la principal caída de tensión se presenta en las líneas de distribución y por consumos inductivos (como los tiene el mismo Microformer [7]).

En el caso de redes de distribución fundamentalmente con líneas aéreas, como es el caso en general de los países latinoamericanos [2], el control de tensión en los distintos nudos de la red se hace con ayuda de bancos de condensadores ubicados cerca de las cargas que consumen potencia [2] [11].

Las situaciones por analizar para decidir la magnitud y la ubicación de los condensadores son básicamente dos: las horas de baja carga y las horas punta. En las horas de mínimo consumo se conectan el mínimo posible de condensadores, para evitar que las tensiones suban mucho y desmejoren la regulación diaria. Como estos condensadores serán requeridos con mayor razón en horas de mayor carga, ellos no poseen interruptor y quedan permanentemente conectados.

2.4.1 Tetrapolo del Microformer (circuito T o estrella)

Antes de estudiar la regulación de tensión enfocada en el Microformer, es importante recordar que en los transformadores convencionales se suele despreciar la rama paralela del modelo del transformador. Sin embargo, el Microformer presenta una admitancia paralela del orden de la impedancia serie, por lo que resulta imposible despreciar su efecto. La mayoría de los elementos de un sistema pueden ser representados por circuitos equivalentes de 4 terminales (tetrapolos) [2]. La importancia de conocer las características del tetrapolo asociado al Microformer radica en facilitar el posterior análisis numérico.

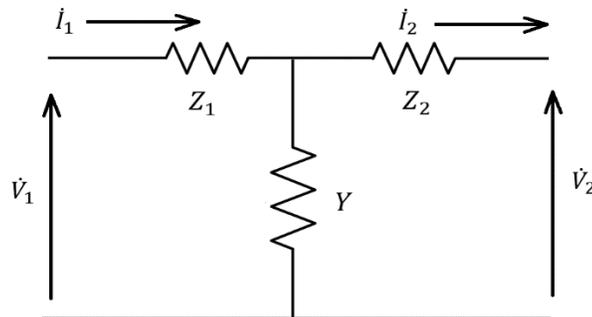


Figura 2.17: Circuito T o estrella.

El circuito T o estrella (figura 2.17) equivale al modelo exacto del transformador, que es el usado para modelar el Microformer y así tener resultados más precisos. Las ecuaciones que rigen circuito presentado son:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z_1 Y & Z_1 + Z_2 + Z_1 Z_2 Y \\ Y & 1 + Z_2 Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

En particular, los parámetros son conocidos y pueden ser obtenidos de las pruebas de cortocircuito y en vacío. Así:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z_{eq}}{2} = \frac{(R_{eq} + jX_{eq})}{2} \quad (2.48)$$

$$Y = \frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{jX_m} \quad (2.49)$$

De (2.47) pueden derivarse una serie de ecuaciones, pero las más útiles son las que relacionan la potencia con las tensiones V_1 y V_2 . Designando por θ el ángulo de adelanto de V_1 respecto de V_2 y definiendo que $\bar{A} = A \angle \alpha$, $\bar{B} = B \angle \beta$, $\bar{C} = C \angle \gamma$ y $\bar{D} = D \angle \delta$, se pueden escribir en forma cartesiana como:

$$P_1 = \frac{D}{B} V_1^2 \cos(\beta - \delta) - \frac{V_1 V_2}{B} \cos(\beta - \theta) \quad (2.50)$$

$$Q_1 = \frac{D}{B} V_1^2 \sin(\beta - \delta) - \frac{V_1 V_2}{B} \sin(\beta + \theta)$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{B} \cos(\beta - \theta) - \frac{A}{B} V_2^2 \cos(\beta - \alpha) \quad (2.51)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2}{B} \sin(\beta - \theta) - \frac{A}{B} V_2^2 \sin(\beta - \alpha)$$

Estas relaciones de P y Q permiten hacer algunos análisis sobre la influencia de las tensiones V_1 y V_2 y el ángulo θ sobre la transmisión por el tetrapolo.

2.4.2 Diagrama del extremo receptor y regulación de transmisiones radiales con admitancia

Llevadas a ejes cartesianos $P - Q$, las relaciones anteriores constituyen un procedimiento gráfico de cálculo muy útil en estudios de tetrapolos sencillos, especialmente cuando se varían de forma paramétrica algunas condiciones de operación. La mayoría de las veces se trata de variar ya sea $|V_1|$, $|V_2|$, θ o alguna combinación de ellos [2].

El diagrama del extremo receptor es uno de los más utilizados, ya que proporciona las condiciones de operación en el extremo receptor (V_2, P_2, Q_2) para diferentes valores de V_1 y de θ .

Sea entonces un tetrapolo de parámetros generales conocidos, en el que la tensión en el extremo receptor es $V_2 \angle 0^\circ$, y la tensión en el extremo transmisor es $V_1 \angle \theta$. De la ecuación (2.49) se tiene que:

$$S_2 = P_2 + jQ_2 = -\frac{A}{B} V_2^2 \angle(\beta - \alpha) + \frac{V_1 V_2}{B} \angle(\beta - \theta) \quad (2.52)$$

Llevado a un sistema de ejes cartesianos $P_2 - Q_2$ y supuestos constantes $|V_1|$ y $|V_2|$, el lugar geométrico de S_2 para diferentes θ será una circunferencia con centro $[-AV_2^2/B]$ en el tercer cuadrante y radio $V_1 V_2/B$, y en el cual los ángulos θ se miden desde $\overline{O_2 M}$ hacia la

derecha (ver figura 2.18). Las proyecciones sobre los ejes cartesianos de un punto cualquiera de la circunferencia darán la potencia activa P_2 y la reactiva Q_2 .

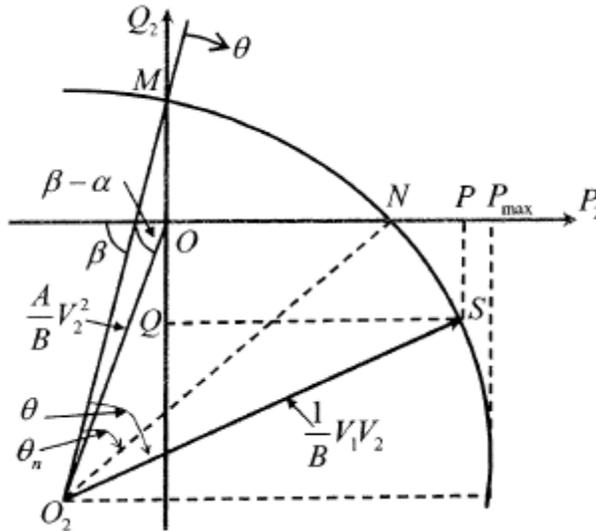


Figura 2.18: Diagrama del extremo receptor [2]

Se observa que para tensiones V_1 y V_2 fijas (θ variable), sólo se puede recibir potencia activa positiva, al menos para algún rango de θ , siempre que $V_1 \geq AV_2 \cos(\beta - \alpha)$. En tales condiciones Q_2 será negativo, lo que equivale a decir que habrá que inyectar potencia reactiva al tetrapolo.

Como los consumos reales son normalmente inductivos, el lograr la transmisión de potencias activas grandes implica hacer artificialmente Q_2 negativo. Ello se logra recurriendo a la conexión de condensadores en paralelo con el consumo.

La figura 2.18 se puede describir también en coordenadas cartesianas mediante la ecuación de la circunferencia:

$$\left[P_2 + \frac{A}{B} V_2^2 \cos(\beta - \alpha) \right]^2 + \left[Q_2 + \frac{A}{B} V_2^2 \sin(\beta - \alpha) \right]^2 = \left[\frac{V_1 V_2}{B} \right]^2 \quad (2.53)$$

2.5 Estándares y normas

En la presente sección se mostrarán algunos estándares internacionales y normativas nacionales a los que el Microformer debe someterse.

2.5.1 Niveles de tensión

El Decreto Supremo N°327 en el artículo 243 [12] fija las magnitudes de la tensión nominal de 50 Hz. En baja tensión, excluyendo periodos con interrupción de suministro, el valor estadístico de la tensión medida de acuerdo con la norma técnica correspondiente, deberá estar dentro del rango de -7,5% a +7,5% durante el 95% del tiempo de cualquiera semana

del año o de siete días consecutivos de medición y registro. Para zonas rurales este intervalo es más permisivo pasando de 7,5% a 10%.

2.5.2 Armónicos

El estándar IEEE 519 [13] fija los niveles de armónicos de corriente y tensión que debe medirse en el punto común de conexión (PCC) que es el nudo más cercano de la red donde dos o más usuarios obtienen energía eléctrica. La tabla 2.4 muestra los límites de distorsión de tensión donde se especifica el porcentaje máximo recomendado que deben tener las distintas armónicas y la distorsión armónica total (THD).

Tabla 2.4: Límites de distorsión de tensión

Tensión V de PCC	Armónica individual (%)	THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 < V$	1,0	1,5

Por otra parte la tabla 2.5 muestra los límites de distorsión armónica de corriente para sistemas entre 120 V y 69 kV, donde los valores están clasificados por el cociente entre la máxima corriente de cortocircuito (I_{CC}) y la máxima demanda de corriente (I_L) y por el orden de la armónica.

Tabla 2.5: Límites de distorsión de corriente para sistemas entre 120 V y 69 kV

I_{CC}/I_L	Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de I_L					THD [%]
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

La norma chilena se basa en las recomendaciones de la IEEE. El artículo N°18 de las disposiciones transitorias del DS N°327/97 considera al menos que [12]:

- Las variaciones de tensión con duración comprendida entre 1 y 180 segundos y cuyo rango de variación sea en cualquier instante de ese periodo al 7,5 % del valor nominal.
- En condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un periodo de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos que el 95% de los valores estadísticos de las corrientes armónicas y de su índice de distorsión total cumplen con lo indicado en la tabla 2.5.

Para las armónicas de tensión del artículo 25 del mismo Decreto Supremo establece que en todo sistema eléctrico, en condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un periodo de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o siete días consecutivos, que el 95% de los valores estadísticos de las tensiones armónicas y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en la tabla 2.4.

2.5.3 Temperatura

La norma chilena NSEG 16.E.n.78 [14] referente a especificaciones de transformador de distribución de 13,2 *kV*, determina que cuando se opera el transformador en régimen permanente a potencia nominal, no debe exceder las siguientes elevaciones de temperatura:

- Aumento de temperatura de cada enrollado medido por una resistencia: 65°C.
- Aumento de temperatura del punto más caliente 80°C.

Capítulo 3

Implementación

3.1 Construcción de Microformers

La construcción de Microformers se realizó en dos etapas: la primera siguiendo las recomendaciones dadas en 2.2.3 donde se modificaron 11 MOT's con sus pruebas respectivas; y la segunda etapa, en la que se usaron los resultados de la primera para optimizar el rendimiento de los MOT's anteriores. A continuación, se detalla el proceso de construcción de los Microformers.

3.1.1 Caracterización de MOT's

Se reunieron 11 MOT's de los cuales 6 fueron obtenidos de microondas malos y el resto estaban disponibles de trabajos anteriores. La tabla 3.1 muestra las dimensiones de los transformadores disponibles a partir de las longitudes especificadas en la figura 3.1.

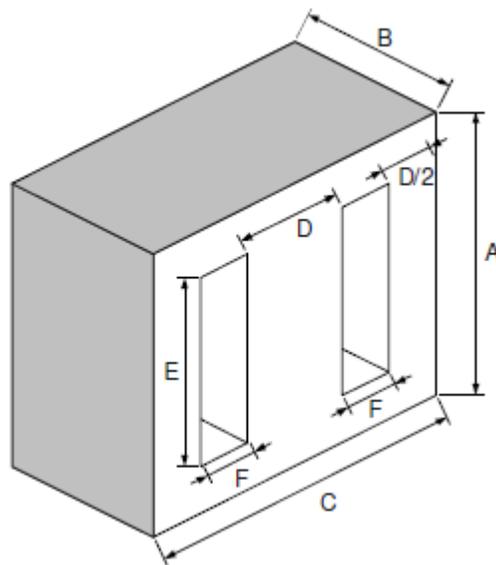


Figura 3.1: Dimensiones del núcleo

Tabla 3.1: Dimensiones de los transformadores

Transformador	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	F [mm]	E [mm]
MOT 1	8,0	7,0	9,6	3,2	1,6	4,8
MOT 2	7,5	6,3	9,0	3,0	1,5	4,5
MOT 3	7,5	7,5	9,0	3,0	1,5	4,5
MOT 4	9,6	7,0	8,0	3,2	1,6	6,4
MOT 5	8,7	6,7	10,5	3,5	1,8	5,2
MOT 6	9,0	7,0	10,5	3,5	1,8	5,5
MOT 7	10,5	7,2	8,8	3,5	1,8	7,0
MOT 8	9,0	6,1	10,5	3,5	1,8	5,5
MOT 9	7,5	7,0	9,0	3,0	1,5	4,5
MOT 10	8,0	7,3	9,6	3,2	1,6	4,8
MOT 11	8,7	6,5	10,5	3,5	1,8	5,2

Las figuras 3.2 -3.11 muestran los MOT's recolectados para las posteriores pruebas. Por otra parte, la tabla 3.2 muestra los datos de placa de los MOT's siendo algunos obtenidos directamente de la información de la etiqueta pegada en su núcleo (tensión, frecuencia y clase) y otros datos de los microondas conseguidos (potencia principalmente).

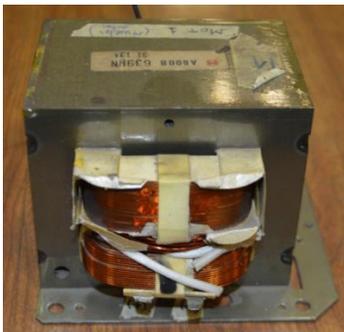


Figura 3.2: MOT 1



Figura 3.3: MOT 2



Figura 3.4: MOT 3



Figura 3.5: MOT 4



Figura 3.6: MOT 5



Figura 3.7: MOT 6



Figura 3.8: MOT 7



Figura 3.9: MOT 8



Figura 3.10: MOT 9

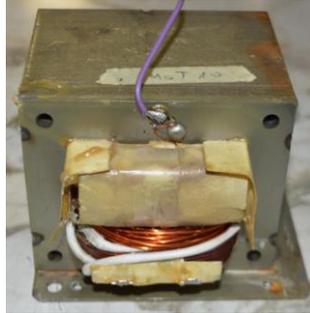


Figura 3.11: MOT 10

Tabla 3.2: Datos de placa de los transformadores

Transformador	Potencia nominal [W]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Clase
MOT 1	-	-	-	-
MOT 2	1250	220	50	220
MOT 3	-	220	50	-
MOT 4	-	220	50	-
MOT 5	1150	220	50	200
MOT 6	1550	220	50	-
MOT 7	2800	230	50	200
MOT 8	1300	230	50	200
MOT 9	1200	230	50	-
MOT 10	-	-	-	-
MOT 11	-	-	50	-

Cabe señalar que la disponibilidad de los transformadores no fue inmediata: primero se juntaron los primeros siete MOT's a los que se les realizó las pruebas respectivas de 4.1.1, ya se tenía considerado hacer una red con los siete Microformers. Sin embargo, el MOT 5 no tenía parámetros adecuados para un uso como transformador de distribución. Luego, para ampliar la red de seis a nueve Microformers se consiguieron tres transformadores adicionales donde el MOT 9 también presentó problemas en sus parámetros por lo que se dejaron 8 MOT's para construir la red. Finalmente se consiguió un MOT extra debido a que el MOT 4 presentó problemas de aislación.

3.1.2 Modificación de MOT's

Para tener un mejor rendimiento de los transformadores se procedió a modificarlos según lo sugerido por 2.2.3.

3.1.2.1 Extracción de barras magnéticas

La extracción de las barras magnéticas de los MOT's tiene por objetivo disminuir la corriente de fuga en los enrollado, y así, amortiguar las pérdidas reactivas por dicho efecto.

Para extraer las barras magnéticas se debe golpearlas con un objeto resistente y de diámetro no mayor al espesor de las barras como lo es un desatornillador de paleta. Se debe fijar el transformador firmemente con una prensa y así golpear fuerte las barras con el desatornillador y un martillo hasta que logren salir, cuidando de no dañar los enrollados.

3.1.2.2 Adición de espiras

Con el espacio que dejan las barras magnéticas se pueden añadir vueltas en el enrollado de baja tensión y así disminuir la corriente de magnetización en el núcleo a costa de aumentar las pérdidas por efecto Joule en el cobre de los enrollados y disminuir la razón de transformación de los transformadores. Sin embargo, este último efecto se puede aprovechar para igualar las tensiones en el lado de alta ya que los MOT's serán utilizados en una red trifásica.

a. Estimación del número de vueltas por enrollado

Para la estimación de la cantidad de vueltas que deben ser agregadas por enrollado se utiliza el método descrito en 2.2.3 donde se utiliza el hueco dejado por las barras magnéticas para insertar un enrollado exploratorio con un número de vueltas conocido, en este caso se utiliza una espira con 10 vueltas. Al energizar el lado de baja con una tensión conocida se obtiene una tensión inducida en la bobina exploratoria. Luego, ocupando la ecuación de transformador ideal (2.9) se obtiene una aproximación del número de vueltas del enrollado de baja tensión.

Para determinar el número de vueltas del enrollado de alta se utiliza nuevamente la ecuación del transformador ideal, esta vez se debe conocer la razón de transformación original de cada MOT (ver 4.1.1.2) y el número de vueltas del enrollado de baja anteriormente calculado. La tabla 3.3 muestra el número de vueltas calculado para cada transformador. Al MOT 9 no se le calcula el número de vueltas debido a que tiene una corriente de excitación muy alta y una razón de transformación baja, y por otra parte el MOT 11 ya se encuentra modificado por trabajos anteriores.

Tabla 3.3: Número de vueltas calculados para cada transformador

Transformador	N° de vueltas enrollado B.T	N° de vueltas enrollado A.T.
MOT 1	326	3160
MOT 2	242	2485
MOT 3	207	2262
MOT 4	233	2440
MOT 5	226	2128
MOT 6	242	2570
MOT 7	242	2479
MOT 8	246	2467
MOT 9	-	-
MOT 10	221	2206
MOT 11	-	-

b. Cálculo de espiras adicionales

Como la mayoría de los transformadores poseen una razón de transformación aproximada de 10 (equivalente a 2,2 kV si se alimenta con 220 V), se fija una tensión única en el lado de alta de 2 kV, esto equivale a una razón de transformación aproximada de 9,1.

Con la ecuación (2.45) se puede calcular el número de vueltas extras que se deben añadir al enrollado de baja tensión si se conoce el número de vueltas de los enrollados y la razón de transformación deseada. La tabla 3.4 muestra el número de vueltas que se deben agregar.

Tabla 3.4: Número de espiras extras por transformador

Transformador	Espiras calculadas
MOT 1	14
MOT 2	32
MOT 3	36
MOT 4	34
MOT 5	6
MOT 6	32
MOT 7	30
MOT 8	25
MOT 9	-
MOT 10	22
MOT 11	-

3.2 Red experimental

3.2.1 Requerimientos

Se desea diseñar una red experimental que simule una pequeña red rural donde sus consumos estén distantes unos de otros. Dicho sistema debe ser radial como gran parte de los sistemas rurales [10]. Se disponen 8 Microformers aptos para diseñar y construir dicho sistema eléctrico, debe haber un banco trifásico de Microformers que sea capaz de elevar tensión de 220 V a 2 kV para luego bajarla con el resto de los Microformers en forma monofásica. Por otra parte, se debe estudiar la regulación de tensión y mejorarla con compensación de reactivos.

Por último, se debe construir una red que sea de fácil manejo para estudiantes además de cumplir con criterios mínimos de seguridad, ya que se pretende que dicha red quede disponible para fines pedagógicos.

3.2.2 Diseño

3.2.2.1 Red experimental tentativa

El diseño de la red experimental está limitado por la cantidad de Microformers disponibles. Como se explicó en 3.1.1, no se tuvo disponibilidad de todos los Microformers al mismo tiempo, por lo que en un principio se optó por construir una red simple de 6 transformadores, con un transformador trifásico de subida compuesto por los MOT's 4, 6 y 7, que eran los transformadores con la menor corriente de excitación (ver 4.1.1) y un transformador de bajada por fase correspondiente a los MOT's 1, 2 y 3.

Los MOT's 8, 9 y 10 llegaron justo antes de concluir en 4.1.1.5, que es mejor aprovechar al máximo el espacio dejado por las barras magnéticas para disminuir la razón de transformación y así tener una mejor regulación. El MOT 9 es desechado debido a que posee una baja razón de transformación junto a una alta corriente de excitación, con esto se tiene una disponibilidad de 5 transformadores de bajada. Finalmente, al detectar el cortocircuito en el transformador 4 se cambia por el MOT 11 correspondiente a un transformador ya modificado de trabajos anteriores.

En este contexto final, se pretende diseñar una red que cubra la mayor cantidad de casos de estudios. Como se disponen 5 Microformers de bajada, se debe designar dos por fase excepto una que debe tener un solo Microformer, aleatoriamente se decide dejar la fase b con sólo uno. La figura 3.12 muestra una de red tentativa, donde se debe determinar el largo de las líneas y la posición de los Microformers, el color rojo simboliza las fases y el azul el neutro.

3.2.2.3 Líneas

Para determinar el largo de las líneas se debe fijar una caída máxima de tensión, ésta se asigna en un 2% de la tensión nominal equivalente a 40 V. La corriente nominal por el lado de alta es aproximadamente de 0,35 A, por lo tanto el cable a utilizar debe tener una corriente nominal relativamente baja, un cable de 14 AWG es apropiado para estos requerimientos. La tabla 3.6 muestra los detalles técnicos de un cable de cobre de 14 AWG típico.

Tabla 3.6: Características del cable de 14 AWG

AWG	14
Diámetro [mm]	1,628
Área [mm ²]	2,08
Resistencia eléctrica [Ω/km]	8,28
Corriente admisible a 60°C aislado [A]	15

Con el valor de la resistencia eléctrica se puede estimar el largo máximo que pueden tener las líneas con tal que la caída de tensión sea de 40 V. La ley de Ohm dice que:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1)$$

Además, la resistencia puede ser expresada como:

$$R = R' \cdot l \quad (3.2)$$

Con R' la resistencia en Ω/km y l el largo de la línea. Utilizando las ecuaciones (3.1) y (3.2) se obtiene el largo máximo que puede tener una línea:

$$l = \frac{\Delta V}{I \cdot R'} \quad (3.3)$$

A partir de ésta, se determina que el largo máximo de la línea de la red debe ser de 14 km aproximadamente con una resistencia eléctrica de 8,28 Ω/km. Este tipo de línea es considerada muy corta (< 30 km) por lo tanto se puede desprestigiar el efecto de la susceptancia y reducir el circuito equivalente a una impedancia serie [2]. En cuanto a la reactancia serie, se usa un valor típico de 0,4 Ω/km [2], como este valor representa casi un 5% de la resistencia serie se omite su efecto dejando modelada cada línea con una resistencia serie proporcional a su largo.

Se usan distintos largos de línea para cada tramo, y como el MOT 1 tiene una mejor característica se le asigna el valor calculado máximo de largo de línea que son 14 km. El MOT 10 se dejará a una distancia de 500 m del MOT 1 simulando que son consumos de un mismo sector. El MOT 3 se deja con un largo de línea de 7,5 km desde el alimentador. En tanto, el MOT 2 queda a 2,5 km del alimentador y el MOT 8 a 4,5 km del MOT 2 simulando dos consumos independientes conectados a una misma fase. La tabla 3.7 resume las características de las líneas antes descritas.

Tabla 3.7: Características de las líneas del circuito propuesto

Línea	Largo [<i>km</i>]	Resistencia [Ω]
Línea A-D	2,5	20,70
Línea D-E	4,5	37,26
Línea B-F	7,5	62,10
Línea C-G	14	115,92
Línea G-H	0,5	4,14

3.2.2.4 Cargas

Los consumos previstos son netamente resistivos y habrá uno por cada Microformer. En el Laboratorio de Máquinas del Departamento de Ingeniería Eléctrica se disponen de varias cargas resistivas (figura 3.13), cada una de las cuales con valores similares. La tabla 3.8 muestra los valores asignados a las resistencias donde las cargas están numeradas según el número del Microformer asociados. Además, existen tres niveles de carga para poder llevar a cabo las pruebas de 4.2.

Tabla 3.8: Valores de las cargas resistivas

Carga	Carga C1 [Ω]	Carga C2 [Ω]	Carga C3 [Ω]
Carga 1	207	104	104
Carga 2	226	109	96
Carga 3	192	70	70
Carga 8	164	164	164
Carga 10	207	207	207



Figura 3.13: carga resistiva

3.2.2.5 Condensadores

Se disponen de tres condensadores de alta tensión de $1,05\mu F$ cada uno, los cuales vienen juntos a los microondas (figura 3.14(b)). Estos condensadores pueden servir para regular

tensión en el lado de alta. Sin embargo, cada uno posee una potencia reactiva de casi $1400Var$ siendo más del triple del consumo de reactivos de los Microformers. Para reducir la inyección de reactivos por parte de los condensadores de alta se deben conectar los tres en serie. Por disponibilidad de condensadores, éste se incorpora sólo en el lado de alta del MOT 2.

Por otra parte, al igual que las cargas resistivas, se disponen en el Laboratorio de Máquinas condensadores de baja tensión (figura 3.14(a)), dichos componentes se pueden usar para regular tensión por el lado de 220V de cada Microformer. Sin embargo, para estudiar varios casos se colocará condensador sólo en algunos Microformers. En el MOT 2, aparte del condensador de alta, se instala un condensador en el lado de baja para poder comparar ambas situaciones. Los MOT's 1 y 3 también contarán con un condensador cada uno que ayude a contrarrestar el consumo de reactivos del mismo Microformer. La tabla 3.9 muestra la capacitancia de los condensadores a ocupar, donde los condensadores están numerados con respecto al Microformer asociado.

Tabla 3.9: Características de los condensadores

Condensadores	Tensión [kV]	Capacitancia [μF]
Condensador 1	0,22	16,08
Condensador 2A	2,00	3 x 1,05
Condensador 2B	0,22	22,5
Condensador 3	0,22	16,18



(a)



(b)

Figura 3.14: Condensador de baja tensión (a) y condensador de microondas de 2kV (b)

3.2.3 Red experimental propuesta

La red experimental con las características dadas en 3.2.2 es mostrada en la figura 3.15 donde se precisa la ubicación final de los Microformers, las cargas y condensadores.

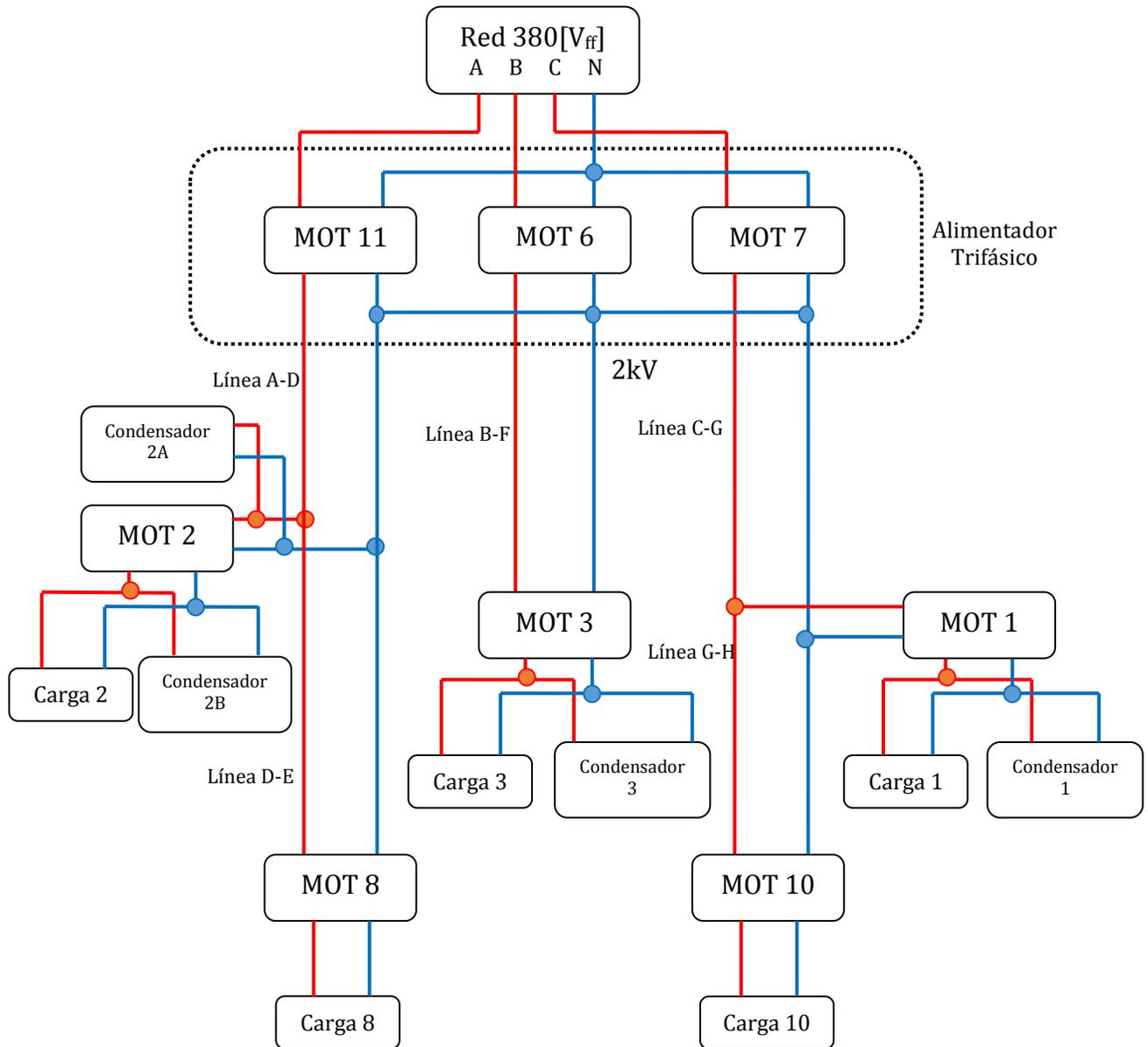


Figura 3.15: Esquema de la red experimental

3.2.4 Construcción

3.2.4.1 Contenedor de los MOT's

Los transformadores de microondas son puestos al interior de tarros metálicos de pintura luego de haberles realizado todas las pruebas de 4.1. Los bornes de alta tensión del contenedor están contruidos en base a tapas de PVC (para la fase energizada), tornillos, golillas y tuercas como se recomienda en [8], mientras que el núcleo del transformador se conecta directamente con el contenedor metálico para evitar que éste quede energizado. Por otra parte, los bornes de baja tensión corresponden a bornes comerciales con aislación para 220V.

El transformador se adhiere al fondo del contenedor con silicona industrial. Los terminales del transformador se extienden mediante cables de 14 AWG hacia los bornes del contenedor metálico identificando con la nomenclatura de polaridad especificada en 2.1.6.2.

La figura 3.16 muestra los contenedores de los transformadores junto a los bornes asociados y sus datos de placa.

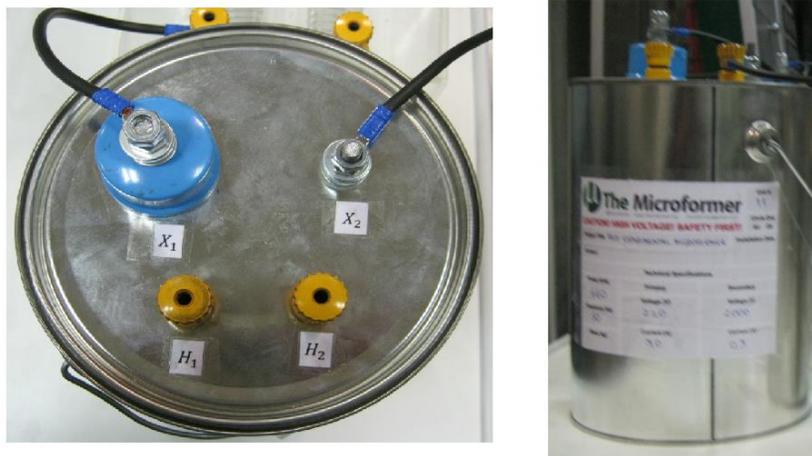


Figura 3.16: Contenedor de MOT's

3.2.4.2 Líneas

Las líneas de transmisión de la red experimental son construidas con alambres de tantalio, material conductor con una resistividad eléctrica siete veces mayor a la del cobre, por lo mismo se puede reproducir la resistencia equivalente a los largos de línea propuestos en la tabla 3.7, como dichos valores no son enteros se construyen líneas de tal forma que su resistencia lo sean. La tabla 3.10 muestra los valores reales de la resistencia de las líneas. Por otra parte, como los valores de las resistencias son muy distintos en algunos casos, se opta por construir dos pares de resistencias por línea. Así, se pueden construir resistencia de tamaños uniformes y se pueden crear distintas configuraciones en serie o paralelo para modificar los largos propuestos en este trabajo.

Tabla 3.10: Valores de resistencia de línea del laboratorio

Línea	Resistencia propuesta [Ω]	Resistencias disponibles [Ω]
Línea A-D	20	40 (x2)
Línea D-E	30	60 (x2)
Línea B-F	60	60 (x2)
Línea C-G	120	60 (x2)
Línea G-H	5	10 (x2)

El alambre de tantalio es enrollado alrededor de una estructura de acrílico tipo cruceta. Esto permite ahorrar material y que se tenga menor superficie de contacto con el tantalio. La figura 3.17 muestra una de las resistencias construidas.

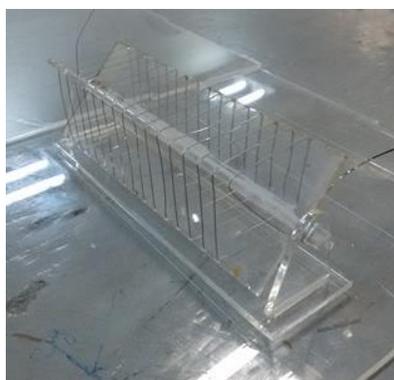


Figura 3.17: Resistencia construida con alambre de tantalio y acrílico

Estas resistencias, por comodidad y seguridad se instalan dentro de cajas de acrílico donde sólo se tiene acceso a los bornes de cada resistencia. Por la topología de la red se arman tres cajas: la primera que contiene seis resistencias en su interior y que está inmediata al banco de Microformers trifásicos, las otras dos tienen dos resistencias cada una y se encuentran posterior al Microformer 1 y 2.

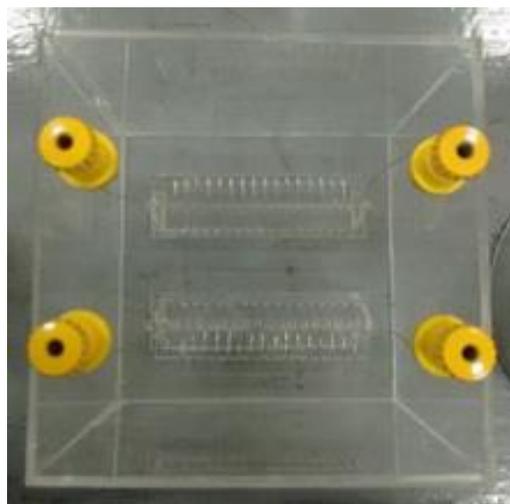


Figura 3.18: Vista superior de caja de resistencias

3.2.4.3 Condensadores

Los condensadores de alta tensión se ubican en la caja que contiene a las 6 resistencias, éstos se ubican junto al par de resistencias correspondiente a la fase *a*. Los condensadores son conectados en serie alcanzando una capacidad equivalente de $1,05 \mu F$, donde sólo se tiene acceso a los bornes de dicha configuración.



Figura 3.19: Condensadores de alta



Figura 3.20: Caja contenedora de seis resistencias junto al arreglo de condensadores

3.2.4.4 Descripción y recomendaciones acerca de la Red de Microformers

La red final queda construida por ocho Microformers, donde se tiene acceso a sus bornes de alta y baja tensión. Sin embargo, para fines pedagógicos posteriores se dejan conectados los bornes de alta con la configuración propuesta en 3.2.3 para evitar la manipulación en el lado de 2 kV . Los bornes de baja tensión (de color amarillo en los Microformers) quedan a libre manipulación.

También se deja conectado un borne del arreglo de condensadores al neutro del Microformer 2, en caso de requerir el uso de los condensadores se debe conectar el borne sobrante con el borne de 2 kV del Microformer 2.

Para el corrector funcionamiento de la red se recomienda:

- No manipular la red mientras esté energizada.
- Conectar un cable desde el neutro de alta de uno de los Microformers a la tierra del laboratorio.
- No superar los 400 W por fase.
- Al término de cada prueba desenergizar inmediatamente la red para evitar sobrecalentamiento de los Microformers y las líneas.
- No cambiar de posición los Microformers de subida con los de bajada debido a que poseen razones distintas de transformación. Sin embargo, ente Microformers del mismo tipo se puede intercambiar posiciones si se amerita.



Figura 3.21: Red experimental de Microformers

3.3 Modelo de red experimental en DigSILENT

3.3.1 Descripción

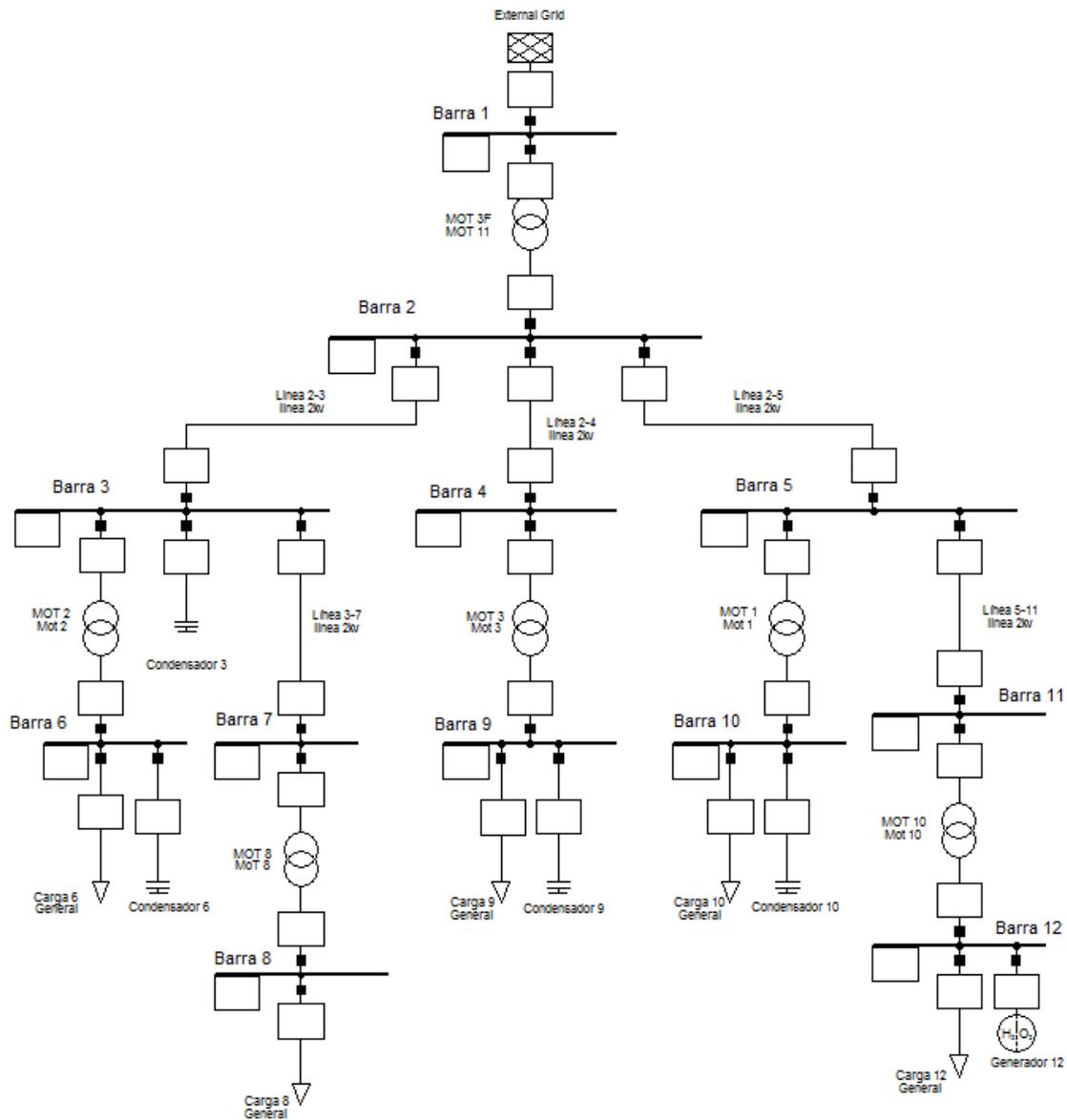


Figura 3.22: Red experimental implementada en DigSILENT

La red experimental propuesta en 3.2 es modelada en el software DigSILENT PowerFactory que es un programa de cálculo para el análisis de la transmisión, distribución y sistemas eléctricos de potencia industriales [15]. El modelo de red (figura 3.22) cuenta con 12 barras, donde los componentes están numerados según su barra respectiva. La barra 1 es una barra del tipo slack donde se conecta una red externa que alimenta el sistema con 380 V entre fases, el nivel de tensión nominal de las demás barras son mostrados en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Tensiones nominales de las barras

Barra	Tensión [kV]
Barra 1	0,380
Barra 2	3,464
Barra 3	3,464
Barra 4	3,464
Barra 5	3,464
Barra 6	0,380
Barra 7	3,464
Barra 8	0,380
Barra 9	0,380
Barra 10	0,380
Barra 11	3,464
Barra 12	0,380
Barra 13	0,380
Barra 14	0,380

En la barra 1 se encuentra el transformador “MOT 3F” correspondiente a un alimentador trifásico compuesto por tres Microformers. Luego, el sistema se divide en tres sistemas monofásicos cada uno compuesto por Microformers, cargas, condensadores, líneas y generadores, este último elemento es agregado para estudiar el comportamiento de la red con generación distribuida una vez validado el modelo de la red experimental.

3.3.2 Componentes

3.3.2.1 Alimentador trifásico

Como se mencionó anteriormente, el transformador principal corresponde a un transformador trifásico. En 3.2.2.2 se asignaron los MOT's 6, 7 y 10 para conformar el alimentador trifásico en conexión estrella-estrella, sin embargo, en DigSILENT PowerFactory no se puede ingresar los datos de los tres transformadores por separado. Por lo tanto, se opta por tomar un promedio de los parámetros de los tres transformadores. La tabla 3.12 muestra los datos de entrada del modelo del transformador en DigSILENT, donde el MOT 3F corresponde a un transformador trifásico con una potencia nominal tres veces superior a los transformadores monofásicos, la tensión en el lado de alta fue calculada a partir de la ecuación (2.9) ocupando las razones de transformación de la tabla 4.1.

Tabla 3.12: Parámetros del transformador trifásico MOT 3F

MOT	Potencia nominal [kW]	Frecuencia [Hz]	Tensión nominal		Impedancia de secuencia positiva		Impedancia de magnetización	
			Lado de baja [kV]	Lado de alta [kV]	Tensión de c.c. [%]	Pérdidas en el cobre [kW]	Corriente en vacío [%]	Pérdidas en vacío [kW]
MOT 6	0,66	50	0,380	3,5019	9,14	0,028	23,33	0,033
MOT 7	0,66	50	0,380	3,4676	8,86	0,026	30,67	0,031
MOT 11	0,66	50	0,380	3,4295	10,05	0,028	36,00	0,033
MOT 3F	1,98	50	0,380	3,4663	9,35	0,082	30	0,097

Al modelo del Microformer en DigSILENT se le agrega la curva de saturación del núcleo correspondiente al MOT 6 que es el que tiene un comportamiento más representativo de los tres (esto se ahonda con detalle en 4.1.2.4).

3.3.2.2 Microformers de bajada

DigSILENT trabaja con el modelo exacto del transformador presentado en la sección 2.1.3 (figura 3.23), los parámetros usados en dicho modelo son calculados a partir de datos entregados por la prueba en vacío y de cortocircuito.

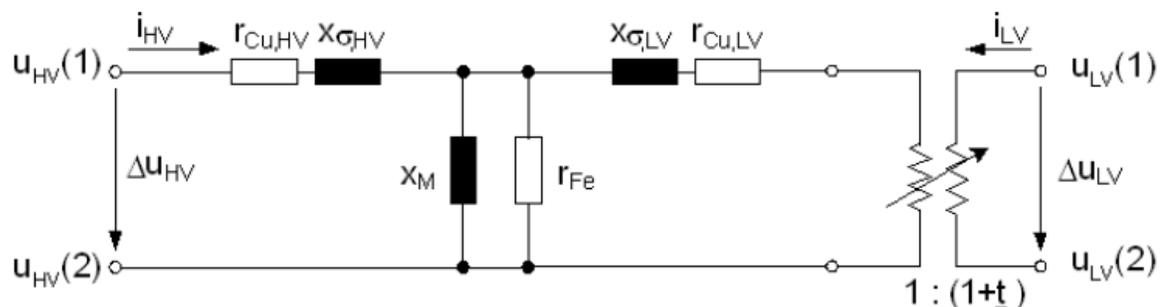


Figura 3.23: Modelo del transformador en DigSILENT [16]

Para una correcta simulación en DigSILENT se debe especificar una serie de datos los cuales son resumidos en la tabla 3.13, donde todos los valores son sacados directamente de las pruebas en vacío y de cortocircuito de las sección 4.12, para el cálculo de la tensión en el lado de alta se utiliza la razón de transformación de la tabla 4.6 (2.9).

Tabla 3.13: Parámetros de los Microformers de bajada

MOT	Potencia nominal [kW]	Frecuencia [Hz]	Tensión nominal		Impedancia de secuencia positiva		Impedancia de magnetización	
			Lado de baja [kV]	Lado de alta [kV]	Tensión de c.c. [%]	Pérdidas en el cobre [kW]	Corriente en vacío [%]	Pérdidas en vacío [kW]
MOT 1	0,66	50	0,22	1,8480	11,86	0,035	16,67	0,030
MOT 2	0,66	50	0,22	1,8678	13,36	0,050	23,00	0,022
MOT 3	0,66	50	0,22	1,9382	11,50	0,049	40,33	0,046
MOT 8	0,66	50	0,22	1,8744	10,32	0,026	22,33	0,029
MOT 10	0,66	50	0,22	1,8546	9,82	0,029	28,67	0,028

DigSILENT ofrece varias alternativas para conectar un transformador monofásico, la más adecuada para la aplicación del Microformer es la conexión D-D que se usa principalmente para crear una línea monofásica con neutro (o bifásica) a partir de una red trifásica o bifásica. La figura 3.24 muestra el esquema de una conexión D-D, para el modelo del Microformer se considera una impedancia nula en el neutro.

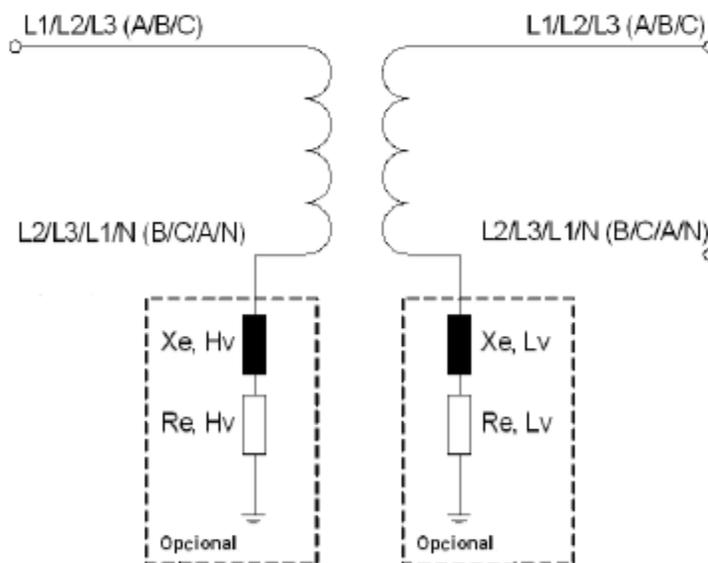


Figura 3.24: Conexión D-D para transformador monofásico [16]

3.3.2.3 Cargas

Se ocupan 5 cargas del tipo PQ de tecnología fase-neutro (figura 3.25) las que son modeladas como cargas de impedancia constante, es decir, la potencia consumida es proporcional al cuadrado de la tensión. Al momento de simular se ingresa la potencia activa que debiesen consumir las cargas a potencia nominal.

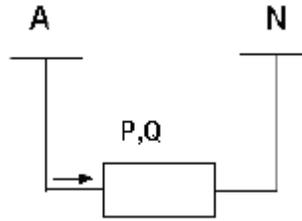


Figura 3.25: Carga fase neutro [16]

La tabla 3.14 muestra los valores de carga utilizados, dichos parámetros son calculados a partir de las resistencias ocupadas en 3.2.2.4. Donde se utilizó que:

$$P_{nom} = \frac{V_{nom}^2}{R_{carga}} \quad (3.4)$$

Tabla 3.14: Potencia nominal de las cargas

Consumo	P_{nom} carga 1 [W]	P_{nom} carga 2 [W]	P_{nom} carga 3 [W]
Carga 6	214	445	506
Carga 8	294	294	300
Carga 9	252	685	685
Carga 10	234	465	465
Carga 12	234	234	234

3.3.2.4 Condensadores

La red experimental tiene disponible 4 condensadores con el fin de compensar el consumo de reactivos de los Microformers. Dichos condensadores son monofásicos de tecnología fase-neutro con capacitancia fija, las cuales tienen los mismos valores de los condensadores ocupados en la red experimental de 3.2.2.5. La tabla 3.15 muestra los datos de los transformadores disponibles en el modelo de la red experimental.

Tabla 3.15: Características de los condensadores

Condensador	Tensión [kV]	Capacitancia [μF]
Condensador 3	2,00	3 x 0,35
Condensador 6	0,22	22,50
Condensador 9	0,22	16,18
Condensador 10	0,22	16,08

3.3.2.5 Líneas

Las líneas ocupadas son de las mismas características descritas en la sección 3.2.2.3. La tabla 3.16 muestra un resumen de los datos ocupados para el modelo de la red experimental.

Tabla 3.16: Parámetros de línea

Línea	Fase	Tensión [kV]	Corriente [kA]	Largo [km]	Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]
Línea 2-3	a	2,0	0,025	2,5	20,70	1,0
Línea 3-7	a	2,0	0,025	4,5	37,26	1,8
Línea 2-4	b	2,0	0,025	7,5	62,10	3,0
Línea 2-5	c	2,0	0,025	14,0	115,92	5,6
Línea 5-11	c	2,0	0,025	0,5	4,14	0,2

Capítulo 4

Análisis y resultados

4.1 Pruebas de los Microformers

4.1.1 Primeras pruebas

4.1.1.1 Prueba de calentamiento en seco

En 2.2.4 se recomienda realizar una disminución de la corriente nominal de los transformadores con tal que su operación térmica esté dentro de la normativa técnica. Se realiza la prueba de calentamiento cortocircuitando el lado de alta tensión y alimentando los Microformers con tensión reducida con tal de obtener 3 A en el lado de baja y así disminuir la corriente de 3,5 A ocupada por Manuel Gatica [7]. Se registra el valor de la resistencia en el enrollado de baja hasta que su valor no varíe. La tabla 4.1 muestra los valores de la resistencia de los enrollados.

Tabla 4.1: Resultados de la prueba de calentamiento

tiempo [min]	Resistencia del enrollado de baja [Ω]		
	MOT 1	MOT 3	MOT 6
0	1,82	2,35	1,75
20	1,98	2,73	1,96
40	2,07	2,91	2,06
60	2,14	3,03	2,13
80	2,18	3,14	2,17
100	2,22	3,22	2,19
120	2,25	3,26	2,20
140	2,28	3,28	2,21
160	2,29	3,31	2,22
180	2,30	3,33	2,22
200	2,30	3,34	2,22
220	2,31	3,34	2,23
240	2,31	3,35	2,23
260	2,31	3,35	2,23

A partir de la tabla anterior se puede determinar la temperatura de los enrollados por medio de la fórmula:

$$T_i = \frac{R_i - R_0}{R_0} (T_k + T_0) + T_0 \quad (4.1)$$

Donde:

- T_i es la temperatura en el instante i .
- R_i es la resistencia en el instante i .
- R_0 es la resistencia inicial.
- T_k es una constante de $234,5^\circ\text{C}$ para el cobre.
- T_0 es la temperatura inicial.

La figura 4.1 muestra la temperatura calculada de los transformadores en el tiempo. Se observa que los MOT 3 y 6 sobrepasan levemente la máxima temperatura establecida por la norma (65°C por sobre la temperatura ambiente). Sin embargo, estos transformadores no están inmersos en aceite donde su comportamiento térmico debiese variar mejorando la respuesta térmica. Por otra parte, el MOT 3 sobrepasa con creces la temperatura máxima, debido a esto, debe bajarse su corriente nominal para usos prolongados pero para efectos de pruebas del presente trabajo no debiese influir este factor debido a que la temperatura máxima se sobrepasa en un lapso de 50 minutos a 3 A constantes y cada prueba no sobrepasa los 10 minutos.

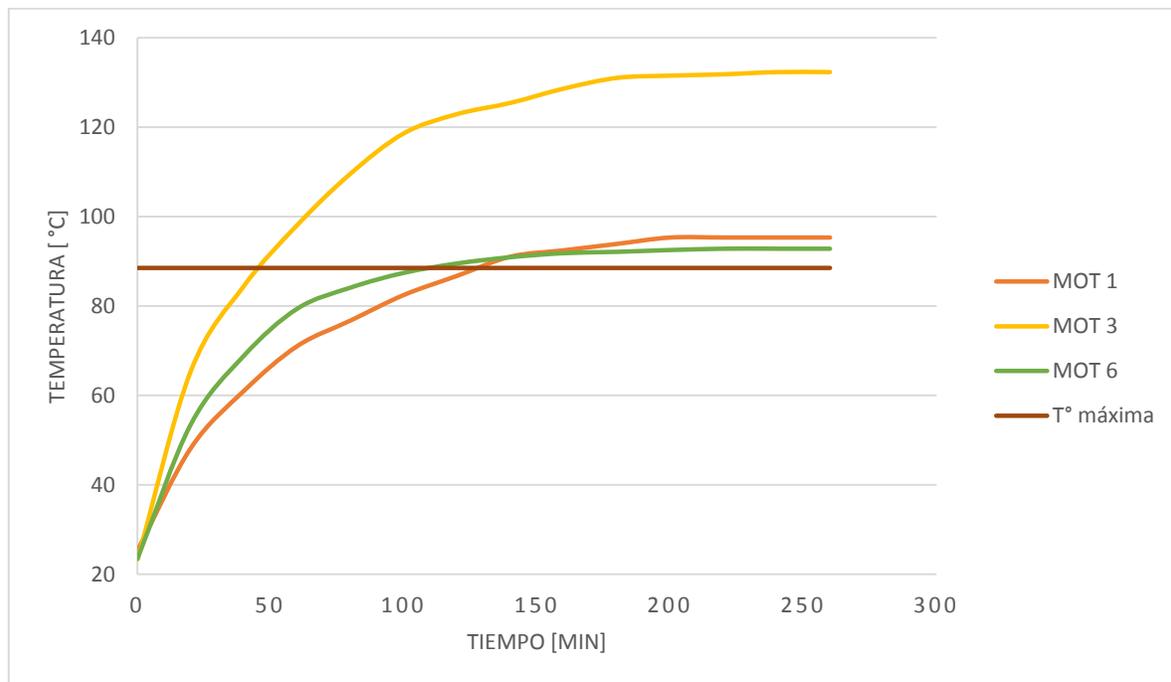


Figura 4.1: Variación de la temperatura de los transformadores en el tiempo

4.1.1.2 Razón de transformación

La razón de transformación de los MOT's se determina con multímetros digitales Multimetrix DMM230 cuyos intervalos de operación fluctúan entre los 0 y 600V. Debido a esto, la prueba se realiza a una tensión reducida en el lado de baja tal que en el lado de alta se consigan 600V. La tabla 4.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos al determinar la razón de transformación de los transformadores mediante el cociente entre

la tensión de alta y la de baja. Estas medidas se realizaron para los transformadores sin sus barras magnéticas y luego modificados con la adición de espiras extras.

Tabla 4.2: Razón de transformación de los MOT's sin barras magnéticas y modificados

MOT	Sin barras magnéticas	Con espiras adicionales	
	Razón de transformación	Espiras añadidas	Razón de transformación
MOT 1	9,66	14	9,25
MOT 2	10,28	32	9,12
MOT 3	10,93	36	9,14
MOT 4	10,44	34	9,12
MOT 5	9,43	6	9,14
MOT 6	10,64	32	9,19
MOT 7	10,26	30	9,10
MOT 8	10,04	25	9,12
MOT 9	9,20	-	-
MOT 10	10,00	22	9,11
MOT 11	-	-	9,00

4.1.1.3 Prueba en vacío

La prueba en vacío se realiza tal como se describe en la sección 2.1.7.3, en particular se utiliza un multímetro digital de tenaza HIOKI 3286-20 que es capaz de medir simultáneamente tensión, corriente y potencia activa entre otras variables. La tabla 4.3 muestra la corriente de excitación (absoluta y relativa con respecto a la corriente nominal de 3 A) junto a las pérdidas de potencia activa que se obtiene al alimentar los MOT's con una tensión nominal de 220 V en el lado de baja y dejando el lado de alta en vacío.

Tabla 4.3: Resultados de la prueba en vacío

MOT	Sin barras magnéticas			Con espiras adicionales		
	Corriente de excitación [A]	Corriente relativa de excitación [%]	Pérdidas [W]	Corriente de excitación [A]	Corriente relativa de excitación [%]	Pérdidas [W]
MOT 1	1,99	66,33	48	1,09	36,33	37
MOT 2	3,86	128,67	77	1,4	46,67	30
MOT 3	3,73	124,33	94	1,63	54,33	51
MOT 4	3,03	101,00	51	0,88	29,33	27
MOT 5	2,52	84,00	54	2,05	68,33	47
MOT 6	3,57	119,00	72	0,70	23,33	33
MOT 7	3,86	128,67	77	0,92	30,67	31
MOT 8	-	-	-	1,32	44,00	35
MOT 9	2,66	88,67	69	-	-	-
MOT 10	-	-	-	1,52	50,67	37
MOT 11	-	-	-	1,08	36,00	33

4.1.1.4 Prueba de corto circuito

Esta prueba se realiza con el mismo instrumento de medida anterior, ocupando el procedimiento descrito en la sección 2.1.7.4. De la prueba de calentamiento se establece que la corriente nominal debe ser 3 A (al menos para las pruebas de laboratorio donde los Microformers no estarán conectados constantemente por más de 20 minutos) se alimenta el lado de baja con una tensión reducida con tal que circule una corriente 3 A por dicho enrollado mientras que el lado de alta se deja en cortocircuito. La tabla 4.4 muestra la tensión de cortocircuito absoluta y relativa con respecto a la tensión nominal, además de las pérdidas en el cobre para el caso inicial de los MOT's sin barras magnéticas y con los MOT's modificados.

Tabla 4.4: Resultados de la prueba de cortocircuito

MOT	Sin barras magnéticas			Con espiras adicionales		
	Tensión de cortocircuito [V]	Tensión relativa de cortocircuito [%]	Pérdidas [W]	Tensión de cortocircuito [V]	Tensión relativa de cortocircuito [%]	Pérdidas [W]
MOT 1	22,2	10,09	30	23,8	10,82	32
MOT 2	23,4	10,64	41	27,3	12,41	48
MOT 3	21,5	9,77	42	23,5	10,68	44
MOT 4	20,0	9,09	28	23,1	10,50	30
MOT 5	24,2	11,00	30	24,6	11,18	31
MOT 6	16,3	7,41	23	20,1	9,14	28
MOT 7	23,4	10,64	41	19,5	8,86	26
MOT 8	-	-	-	20,6	9,36	24
MOT 9	26,3	11,95	45	-	-	-
MOT 10	-	-	-	19,6	8,91	26
MOT 11	-	-	-	22,1	10,05	28

4.1.1.5 Prueba de regulación

De la tabla 4.1 se observa que la razón de transformación de los MOT's 5 y 9 ya se encuentran cercanas a 9,1 con una corriente de excitación elevada (tabla 4.3) siendo muy cercana a la corriente nominal impuesta, quedando una potencia útil disponible muy baja. Por lo tanto, ambos transformadores son apartados dejándolos disponibles para una posible experiencia del curso EL6003 Laboratorio de Energía.

Con los MOT's restantes se debe elegir un grupo trifásico que sea el encargado de elevar tensión actuando como alimentador y otro grupo que sea el encargado de bajar la tensión, cada uno actuando como transformador monofásico. Hay que tener en cuenta que primero se trabajó con los 7 primeros MOT's, ya se mencionó que el MOT 5 no cumplía con las características deseadas. Luego, entre los 6 MOT's restantes se eligieron los que tenían una menor corriente de excitación para ser los transformadores de subida, es decir, los MOT's 4, 6 y 7.

Se realiza una prueba de regulación al transformador 2 para observar la caída de tensión que se tiene en el lado de baja. Se ocupa el MOT 7 para elevar tensión y luego se baja con el

MOT 2 (figura 4.2). La tabla 4.5 muestra la regulación del MOT 7 al variar el nivel de carga en el consumo, se observa que la tensión cae abruptamente al tener cargas cercanas a la nominal donde sus valores se encuentran fuera de norma, incluso estando el circuito en vacío se registra una tensión relativamente baja.

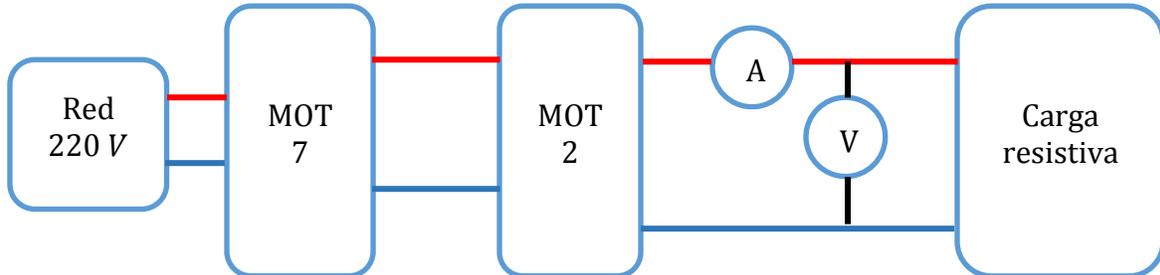


Figura 4.2: Esquema de prueba de regulación

Tabla 4.5: Resultados de la prueba de regulación MOT 2

Tensión [V]	Corriente [A]
210,3	0,00
202,9	1,07
196	1,93
188	2,76

4.1.2 Segundas pruebas

Con el fin de mejorar la regulación de los transformadores y que a carga nominal el nivel de tensión sea aceptable, se decide aprovechar por completo el hueco dejado por las barras magnéticas añadiendo el máximo número de espiras que se pueda colocar y así disminuir la razón de transformación y la corriente de excitación. En esta sección se muestran los resultados de las pruebas de los MOT's de bajada que son a los que se les añade el máximo de espiras posibles, los MOT's de subida no se vuelven a modificar ya que lo importante de éstos es que transmitan en 2 kV.

4.1.2.1 Razón de transformación

La razón de transformación se determina de la misma forma que en la primera tanda de pruebas. La tabla 4.6 muestra los valores la razón de transformación de la primera prueba más los nuevos valores al añadir el máximo de espiras disponibles en el hueco dejado por las barras magnéticas.

Tabla 4.6: Razón de transformación de los MOT's de bajada

MOT	Sin barras magnéticas	Con espiras adicionales		Máximo de espiras adicionales	
	Razón de transformación	Espiras añadidas	Razón de transformación	Total de espiras añadidas	Razón de transformación
MOT 1	9,66	14	9,25	38	8,40
MOT 2	10,28	32	9,12	53	8,49
MOT 3	10,93	36	9,14	41	8,81
MOT 8	10,04	25	9,12	45	8,52
MOT 10	10,00	22	9,11	39	8,43

4.1.2.2 Prueba en vacío

Esta prueba se vuelve a realizar con los MOT's ya elegidos siguiendo el mismo procedimiento de la prueba realizada en 3.2.3. En la tabla 4.7 se muestra la corriente de excitación de cada MOT junto con las pérdidas de potencia activa.

Tabla 4.7: Resultado de la prueba en vacío para los MOT's de bajada

MOT	Con espiras adicionales			Máximo de espiras adicionales		
	Corriente de excitación [A]	Corriente relativa de excitación [%]	Pérdidas [W]	Corriente de excitación [A]	Corriente relativa de excitación [%]	Pérdidas [W]
MOT 1	1,09	36,33	37	0,5	16,67	30
MOT 2	1,4	46,67	30	0,69	23,00	22
MOT 3	1,63	54,33	51	1,21	40,33	46
MOT 8	1,32	44,00	35	0,67	22,33	29
MOT 10	1,52	50,67	37	0,86	28,67	28

4.1.2.3 Prueba de corto circuito

La tabla 4.8 muestra la tensión de cortocircuito y las pérdidas en el cobre al realizar la prueba de cortocircuito a los transformadores seleccionados.

Tabla 4. 8: Resultados de la prueba de cortocircuito para los MOT's de bajada

MOT	Con espiras adicionales			Máximo de espiras adicionales		
	Tensión de cortocircuito [V]	Tensión relativa de cortocircuito [%]	Pérdidas [W]	Tensión de cortocircuito [V]	Tensión relativa de cortocircuito [%]	Pérdidas [W]
MOT 1	23,8	10,82	32	26,1	11,86	35
MOT 2	27,3	12,41	48	29,4	13,36	50
MOT 3	23,5	10,68	44	25,3	11,50	49
MOT 8	20,6	9,36	24	22,7	10,32	26
MOT 10	19,6	8,91	26	21,6	9,82	29

4.1.2.4 Saturación del núcleo

Para tener un modelo bien representativo en el software a ocupar se determina la saturación del núcleo del transformador, ésta se realiza a circuito abierto donde se registra el comportamiento de la corriente al aumentar la tensión de alimentación en el lado de baja de cada MOT hasta llegar a una tensión cercana a los 240 V. La figura 4.3 muestra la curva de saturación de los transformadores de bajada mientras que la figura 4.4 de los pertenecientes a los Microformers de subida.

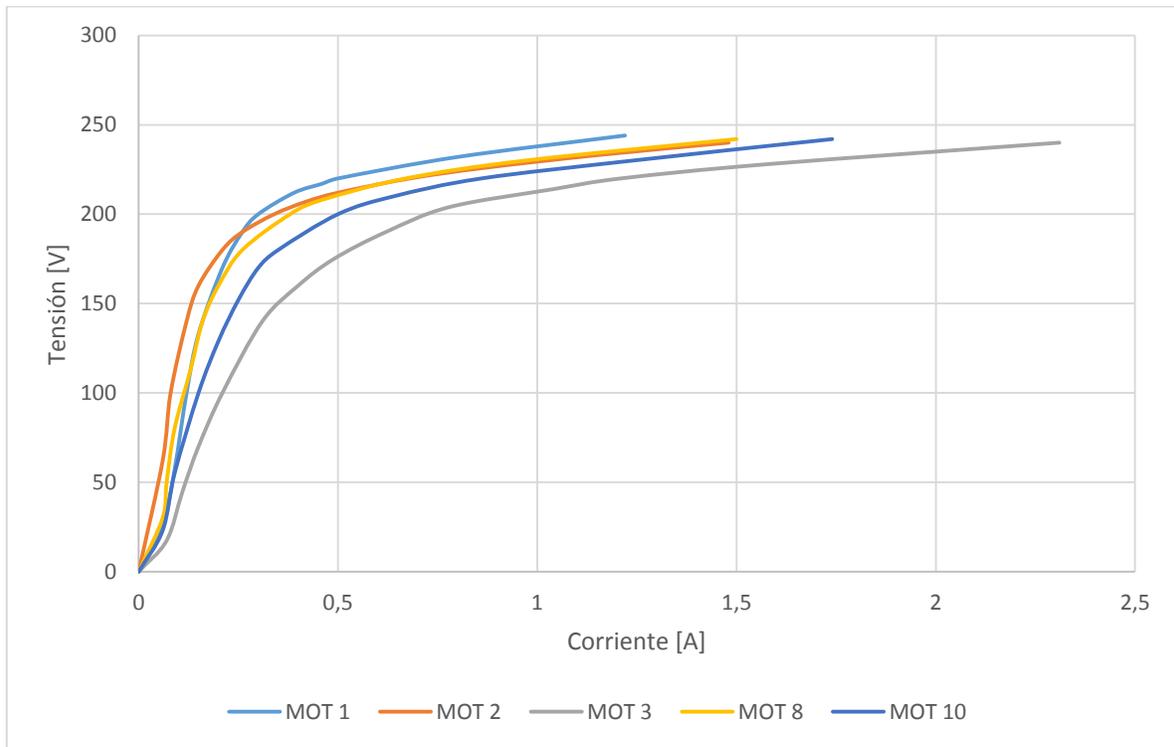


Figura 4.3: Curva de saturación de los MOT's de bajada

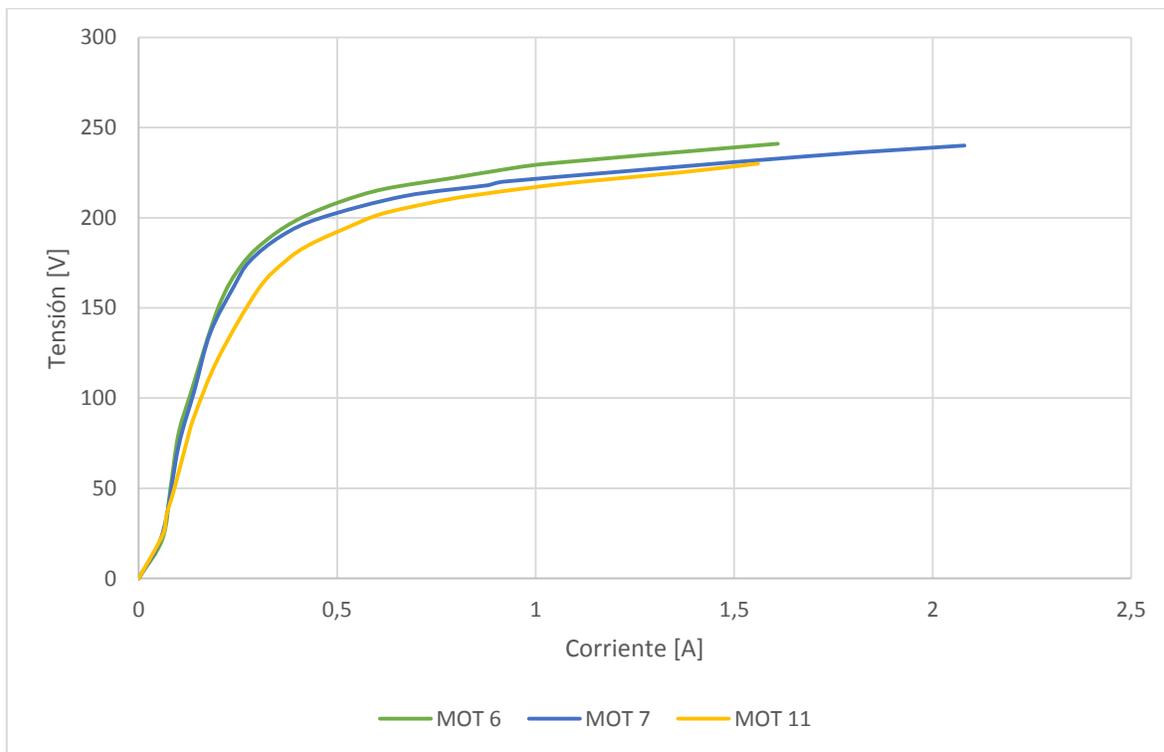


Figura 4.4: Curva de saturación de los MOT's de subida

4.1.2.5 Prueba de regulación

Se vuelve a realizar la prueba de regulación al MOT 2 con la misma configuración anterior (figura 4.2) pero con los cambios en la razón de transformación antes descrito. Los resultados de esta nueva prueba son mostrados en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Resultados de la prueba de regulación MOT 2 modificado

Tensión [V]	Corriente [A]
228,2	0,00
216,7	1,13
206,0	2,00
196,3	2,70

4.1.3 Análisis de resultados

4.1.3.1 Parámetros del Microformer

Los parámetros de los Microformers se calculan en base a las ecuaciones (2.39 – 2.44) junto a las pruebas en vacío y de cortocircuito. La tabla 4.9 muestra los resultados de los cálculos de los parámetros en ohm y por unidad de los Microformers estudiados salvo los MOT's 4, 5 y 9 que fueron descartados, donde la impedancia base es de $73,33 \Omega$ calculada a partir de la potencia nominal ($660 V$) y tensión nominal en baja ($220 V$).

Tabla 4.10: Parámetros de los Microformers

MOT	R_{eq}		X_{eq}		R_{fe}		X_m	
	$[\Omega]$	$[pu]$	$[\Omega]$	$[pu]$	$[\Omega]$	$[pu]$	$[\Omega]$	$[pu]$
MOT 1	3,89	0,0530	7,78	0,1061	1613,33	22,0000	457,34	6,2364
MOT 2	5,56	0,0758	8,07	0,1101	2200,00	30,0000	322,24	4,3942
MOT 3	5,44	0,0742	6,44	0,0878	1052,17	14,3478	184,60	2,5172
MOT 8	2,89	0,0394	6,99	0,0954	1668,97	22,7586	334,90	4,5669
MOT 10	3,22	0,0439	6,44	0,0878	1728,57	23,5714	258,66	3,5272
Promedio	4,20	0,0573	7,15	0,0974	1652,61	22,5356	311,55	4,2484
MOT 6	3,11	0,0424	5,93	0,0809	1466,67	20,0000	321,76	4,3876
MOT 7	2,89	0,0394	5,82	0,0794	1561,29	21,2903	241,99	3,2998
MOT 11	3,11	0,0424	6,68	0,0911	1466,67	20,0000	205,70	2,8050
Promedio	3,04	0,0414	6,14	0,0838	1498,21	20,4301	256,48	3,4975

La tabla anterior se divide en los MOT's pertenecientes a los Microformers de bajada y los Microformers de subida, los primeros son modificados con tal de aprovechar al máximo los huecos dejados por las barras magnéticas para reducir la razón de transformación. Como efecto colateral, se logra incrementar el valor de la impedancia paralela del modelo del transformador debido a que al aumentar el número de vueltas en el enrollado primario se aumenta la densidad de flujo magnético disminuyendo así las pérdidas en el núcleo. Por otra parte, empeoran los parámetros series levemente al aumentar el flujo de fuga y las pérdidas Joule en los enrollados.

La tabla 4.10 muestra la comparación de los resultados promedio obtenidos por Manuel Gatica y los obtenidos en el presente trabajo. Los Microformers de subida presentan un valor similar a los obtenidos por Gatica, debido a que ambos se modificaron con una consigna de razón de transformación similar, sin embargo, los parámetros del presente estudio presentan una leve mejoría debido a que la prueba fue realizada a una menor corriente nominal y, por ende, a una menor temperatura.

Tabla 4.11: Valores promedios de los parámetros

	$R_{fe} [pu]$	$X_m [pu]$	$R_{eq} [pu]$	$X_{eq} [pu]$	$Y_{exc} [pu]$
MOT's bajada	22,5355	4,2477	0,0573	0,0975	0,2395
MOT's subida	20,4300	3,4977	0,0423	0,0832	0,2859
MOT's Gatica	20,2145	2,8268	0,0477	0,0900	0,3537

En comparación con los transformadores industriales los parámetros del Microformer presentan resultados desfavorables. En los primeros generalmente se desprecia admitancia de excitación ya que sólo representa el 0,1% de la impedancia serie [2]. En cambio en los Microformers la admitancia no es para nada despreciable siendo más del doble de la impedancia serie. Lo mismo ocurre con la resistencia de los enrollados donde representan generalmente entre el 10% al 20% de la reactancia de fuga en transformadores industriales y en los Microformers cerca del 60%. Por último, La reactancia de fuga en los transformadores menores a 15 kV es menos del 4% a diferencia del Microformer presenta más de dos veces este valor.

4.1.3.2 Saturación

De las figuras 4.3 y 4.4 se observa que el Microformer no opera en la zona de saturación de la curva, esto tiene muchas implicancias: la primera es que ante un aumento o disminución de la tensión de alimentación (ya sea por el lado de alta o baja) la corriente de excitación puede variar abruptamente, la figura 4.5 muestra la curva de saturación del MOT 6 más la recta que se obtiene si se asume el núcleo con característica lineal, este hecho puede afectar los resultados del modelo en el software, por lo tanto se incluye esta característica no lineal. Otro efecto puede ser el nivel de armónicos que se introduciría en el sistema debido a la no linealidad del núcleo magnético, por lo mismo se recomienda que las conexión en el primario del transformador trifásico de subida se haga en estrella conectada a tierra para que amortiguar los armónicos de tensión.

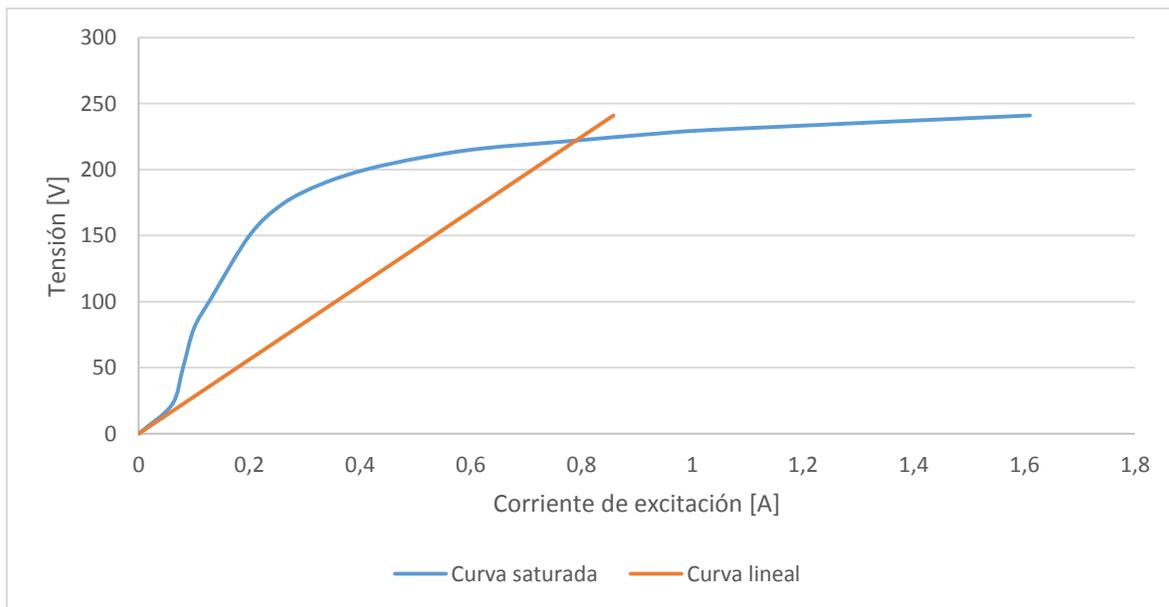


Figura 4.5: Curvas saturada y no saturada del MOT 6

4.1.3.3 Regulación

Los niveles de tensión del MOT 2 mejoran bajo carga al disminuir la razón de transformación en sus enrollados. Sin embargo, sus niveles de tensión siguen estando fuera de la norma al acercarse a sus valores nominales. Esto puede ser mejorado ocupando componentes externos para mejorar los niveles de tensión en el lado de baja (como condensadores) y/o teniendo un transformador de subida que entregue 2 kV bajo carga, ya que los Microformers ocupados en este trabajo entregan 2 kV en vacío el cual disminuye conforme se aumenta la carga.

Por otra parte, la idea de tener Microformers con razones de transformación diferenciada toma relevancia a la hora de evaluar su desempeño en una red. Estas consideraciones serán tomadas en cuenta en las pruebas posteriores.

4.1.3.4 Consideraciones de elección de MOT's

No todos los transformadores de microondas son útiles para ser convertidos en Microformers. Los que presentan núcleos más pequeños tienen mayor probabilidad de ser

transformadores con altas corrientes de magnetización, sin embargo, no se recomienda descartarlos sin antes realizarles las pruebas de razón de transformación y de cortocircuito. Si en dichas pruebas la razón de transformación es baja ($< 9,8$) junto una alta corriente de magnetización ($> 2,5 A$) el transformador debe ser descartado como lo ocurrido con los MOT's 4, 5 y 9.

Otro filtro viene dado por la cantidad de vueltas que tengan los enrollados, mientras menos número de vueltas tengan la densidad de flujo magnético aumenta lo que conlleva a aumentar las pérdidas en el núcleo. Por lo tanto, si un transformador tiene menos de 220 vueltas calculadas junto a una ventana pequeña (dejada por las barras magnéticas) deber ser descartado o se le debe disminuir su potencia nominal, de lo contrario puede calentarse el núcleo de transformador llegando a temperaturas fuera de la norma, como es el caso del MOT 3. Sin embargo, para efectos de estudio se incluye el MOT 3 para observar sus efectos en el sistema propuesto.

4.2 Pruebas de la red experimental

4.2.1 Descripción general

En esta sección se realizarán tres pruebas con la red experimental propuesta en 3.2 para más adelante comparar y validar los resultados obtenidos con el modelo de red de DigSILENT. En cada prueba habrá tres tipos de estados:

- a) Circuito abierto, donde todos los Microformers de bajada están sin carga.
- b) Media carga, donde la corriente por los consumos de los Microformers de bajada es alrededor de 1A.
- c) Plena carga, donde la suma de la corriente de los consumos por fase sea de aproximadamente 3 A.

La medición se realiza con 4 multímetros de tenaza HIOKI 3286-20, 3 para medir tensión, corriente y potencia en cada fase del banco trifásico de Microformers y otro para medir las mismas variables en las cargas resistivas, todas estas mediciones se realizan en el lado de baja tensión.

Por otra parte, se realizan mediciones de armónicos en la red para algunos casos de interés que son descritos más adelante.

4.2.2 Prueba sin condensadores

La primera prueba se realiza sin condensadores para observar qué tanto afectan los consumos a cada Microformer. Las tablas siguientes muestran los resultados de la prueba para los niveles de cargas antes descritos.

Tabla 4.12: Prueba sin condensadores en vacío

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	221,0	2,22	89
	MOT 6	222,2	1,78	80
	MOT 7	221,3	2,45	109
Microformers de bajada	MOT 2	221,8	-	-
	MOT 8	221,8	-	-
	MOT 3	216,3	-	-
	MOT 1	227,2	-	-
	MOT 10	226,2	-	-

Tabla 4.13: Prueba sin condensadores a media carga

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,2	3,21	558
	MOT 6	221,3	2,1	310
	MOT 7	220,1	3,29	573
Microformers de bajada	MOT 2	208,0	0,92	192
	MOT 8	208,5	1,27	266
	MOT 3	206,9	1,08	222
	MOT 1	213,2	1,03	220
	MOT 10	212,5	1,03	218

Tabla 4.14: Prueba sin condensares a plena carga

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	219,7	3,92	744
	MOT 6	221,8	3,36	656
	MOT 7	220,2	4,07	776
Microformers de bajada	MOT 2	197,9	1,82	360
	MOT 8	205,4	1,25	256
	MOT 3	189,9	2,69	511
	MOT 1	203,6	1,95	398
	MOT 10	212,5	1,03	218

4.2.3 Prueba con condensador en alta tensión

La presente prueba se realiza solamente con el condensador de alta tensión conectado en la alimentación del MOT 2. Las tablas siguientes muestran los resultados de la prueba para los niveles de cargas antes descritos.

Tabla 4.15: Prueba con condensador en alta en vacío

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,5	2,62	107
	MOT 6	221,2	1,75	78
	MOT 7	220,2	2,38	106
Microformers de bajada	MOT 2	238,2	-	-
	MOT 8	238,4	-	-
	MOT 3	215,5	-	-
	MOT 1	226,3	-	-
	MOT 10	225,4	-	-

Tabla 4.16: Prueba con condensador en alta a media carga

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,2	3,22	627
	MOT 6	221,5	2,09	307
	MOT 7	220,1	3,24	567
Microformers de bajada	MOT 2	219,2	0,97	212
	MOT 8	219,3	1,33	292
	MOT 3	205,0	1,07	220
	MOT 1	211,1	1,02	215
	MOT 10	211,6	1,02	216

Tabla 4. 17: Prueba con condensador en alta a plena carga

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,4	3,96	835
	MOT 6	222,6	3,34	650
	MOT 7	220,7	4,05	773
Microformers de bajada	MOT 2	207,6	1,9	395
	MOT 8	215,0	1,31	280
	MOT 3	187,6	2,67	501
	MOT 1	203,5	1,95	397
	MOT 10	207,8	1,01	209

4.2.4 Prueba con condensadores en baja

La última prueba se realiza con los condensadores de baja tensión con el condensador de alta desconectado, cabe recordar que los consumos que presentan compensación son los asociados a los MOT's 1,2 y 3. Las tablas siguientes muestran los resultados de la prueba para los distintos niveles de carga propuestos.

Tabla 4.18: Prueba con condensadores en baja en vacío

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,9	2,97	162
	MOT 6	221,7	1,59	89
	MOT 7	221,3	2,28	117
Microformers de bajada	MOT 2	262,3	2,9	6
	MOT 8	234,4	-	-
	MOT 3	231,9	1,45	4
	MOT 1	245,3	1,55	3
	MOT 10	231,7	-	-

Tabla 4.19: Prueba con condensadores en baja a media carga

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,7	3,23	650
	MOT 6	221,1	1,87	336
	MOT 7	219,8	3,07	608
Microformers de bajada	MOT 2	226	2,11	473
	MOT 8	213,9	1,29	276
	MOT 3	216,3	1,68	244
	MOT 1	224,4	1,66	245
	MOT 10	215,8	1,04	223

Tabla 4.20: Prueba con condensadores en baja a plena carga

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Alimentador trifásico	MOT 11	220,3	4,23	902
	MOT 6	22,3	3,26	694
	MOT 7	220,5	3,97	830
Microformers de bajada	MOT 2	206,7	2,65	447
	MOT 8	206,5	1,28	264
	MOT 3	193,9	2,93	531
	MOT 1	213,3	2,34	435
	MOT 10	210,1	1,01	213

4.2.5 Armónicos

A partir de la red experimental se realizan mediciones de armónicos para distintas condiciones de carga en la red. Las armónicas de tensión y corriente son medidas con las mismas tenazas HIOKI 3286-20 así como el índice de distorsión armónica.

4.2.5.1 Armónicas sin condensadores

Las tablas 4.21 y 4.22 muestran las armónicas de tensión fase neutro y de corriente junto a su THD asociado, la primera pertenece a la medición en vacío y la segunda a plena carga.

Tabla 4.21: Distorsión armónica en vacío

	MOT	1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	220,30	1,20	3,20	0,30	0,60	0,40	0,30	1,80
	MOT 6	217,30	1,70	3,30	1,60	1,10	0,80	0,30	2,10
	MOT 7	219,80	2,10	3,90	1,00	0,50	0,70	0,20	2,20
Corriente [A]	MOT 11	1,99	0,89	0,31	0,09	0,02	0,00	0,00	42,10
	MOT 6	1,48	0,60	0,21	0,07	0,02	0,00	0,00	39,80
	MOT 7	2,10	0,88	0,35	0,10	0,02	0,00	0,00	40,90

Tabla 4.22: Distorsión armónica a plena carga

	MOT	1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	220,00	1,40	3,10	1,40	0,70	0,50	0,60	1,80
	MOT 6	217,50	2,20	4,20	1,30	1,30	0,80	0,30	2,50
	MOT 7	220,40	1,90	4,00	1,20	0,70	0,80	0,60	2,20
	MOT 2	210,20	12,50	9,50	2,20	0,70	0,30	0,30	7,40
	MOT 8	212,10	12,00	9,10	2,20	0,70	0,40	0,30	7,10
	MOT 3	187,40	6,60	5,00	1,20	0,80	0,20	0,20	4,60
	MOT 1	214,60	11,60	9,50	2,10	0,80	0,50	0,40	7,20
	MOT 10	214,10	11,80	8,50	2,00	0,70	0,50	0,40	7,30
Corriente [A]	MOT 11	3,01	0,65	0,21	0,07	0,02	0,00	0,00	22,00
	MOT 6	3,22	0,33	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	10,50
	MOT 7	3,18	0,60	0,21	0,07	0,02	0,00	0,00	19,70
	MOT 2	0,94	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50
	MOT 8	1,03	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	7,20
	MOT 3	2,59	0,09	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	4,60
	MOT 1	1,03	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	7,20
	MOT 10	1,03	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	7,10

4.2.5.2 Armónicas con condensadores de alta tensión

Se repite la prueba anterior, esta vez añadiendo el condensador en alta en la fase s y los condensadores en baja en las demás fases. Las tablas 4.23 y 4.24 muestran las armónicas de tensión fase neutro y de corriente junto al THD asociado, la primera pertenece a la medición en vacío y la segunda a plena carga.

Tabla 4.23: Distorsión armónica en vacío con condensadores de alta tensión

		1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	220,10	1,70	2,90	0,10	0,70	0,70	0,20	1,70
	MOT 6	217,20	1,80	3,70	1,50	1,10	0,70	0,20	2,20
	MOT 7	219,60	2,20	4,20	1,30	0,80	0,70	0,50	2,20
Corriente [A]	MOT 11	-	2,50	-	-	-	-	-	-
	MOT 6	1,46	0,59	0,20	0,06	0,02	0,00	0,00	39,60
	MOT 7	2,03	0,89	0,34	0,10	0,02	0,00	0,00	40,80

Tabla 4.24: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de alta tensión

		MOT	1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	218,50	1,60	3,00	1,30	0,70	0,60	0,50	1,70	
	MOT 6	216,30	1,50	3,50	1,80	1,30	0,90	0,40	2,20	
	MOT 7	218,50	2,00	4,30	1,30	0,80	0,60	0,50	2,30	
	MOT 2	218,50	29,80	20,90	3,10	1,00	0,40	0,10	16,50	
	MOT 8	220,60	29,10	21,70	3,60	1,50	0,50	0,20	16,30	
	MOT 3	184,80	6,40	4,80	1,10	0,60	0,20	0,20	4,40	
	MOT 1	212,70	11,20	8,90	2,10	0,70	0,60	0,70	6,80	
	MOT 10	212,50	11,40	9,40	1,90	0,80	0,30	0,40	6,90	
Corriente [A]	MOT 11	2,65	1,37	0,61	0,07	0,03	0,02	0,01	48,90	
	MOT 6	3,11	0,29	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	9,60	
	MOT 7	3,13	0,58	0,20	0,07	0,02	0,00	0,00	18,80	
	MOT 2	0,98	0,13	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	16,60	
	MOT 8	1,08	0,14	0,11	0,02	0,00	0,00	0,00	16,50	
	MOT 3	2,54	0,09	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	16,50	
	MOT 1	1,02	0,06	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	7,00	
	MOT 10	1,03	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	7,10	

4.2.5.3 Armónicas con condensadores de baja tensión

Se realiza una medición de armónicos con los condensadores de baja tensión conectados a los Microformers 1, 2 y 3. Las tablas 4.25 y 4.26 muestran las armónicas de tensión fase neutro y de corriente junto al THD asociado, la primera pertenece a la medición en vacío y la segunda a plena carga.

Tabla 4.25: Distorsión armónica en alimentador en vacío con condensadores de baja tensión

	MOT	1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	221,40	1,60	3,70	0,80	0,80	0,80	0,50	2,00
	MOT 6	220,80	2,10	3,80	1,00	1,20	1,50	0,80	2,20
	MOT 7	220,80	2,50	4,00	0,90	0,80	1,00	0,70	2,40
	MOT 2	239,00	109,30	13,00	4,60	1,80	0,70	0,40	41,60
	MOT 8	228,00	57,20	6,50	2,90	1,80	0,70	0,60	24,50
	MOT 3	224,40	37,50	18,40	3,80	1,40	0,40	0,00	18,50
	MOT 1	238,70	55,90	17,70	2,60	0,90	0,30	0,00	24,00
	MOT 10	228,50	35,30	3,20	1,10	0,70	0,10	0,30	15,30
Corriente [A]	MOT 11	-	2,86	-	-	-	-	-	-
	MOT 6	-	1,40	-	-	-	-	-	-
	MOT 7	-	2,15	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.26: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de baja tensión

	MOT	1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	221,50	1,00	3,90	0,70	0,60	0,70	0,20	1,90
	MOT 6	220,20	1,50	3,60	0,80	1,20	0,80	0,20	2,00
	MOT 7	220,50	1,80	3,90	0,80	,	0,50	0,30	2,00
	MOT 2	223,50	45,30	12,20	3,00	1,00	0,30	0,10	20,30
	MOT 8	215,10	24,20	4,50	2,00	1,10	0,30	0,20	11,40
	MOT 3	193,80	11,40	6,90	1,40	0,30	0,20	0,20	6,90
	MOT 1	222,20	28,80	14,20	1,90	1,00	0,30	0,20	14,00
	MOT 10	215,70	19,00	4,50	1,40	0,70	0,10	0,30	8,90
Corriente [A]	MOT 11	3,02	1,11	0,07	0,07	0,02	0,00	0,00	34,50
	MOT 6	3,23	0,39	0,07	0,03	0,02	0,01	0,00	12,20
	MOT 7	2,94	0,94	0,05	0,06	0,02	0,00	0,00	30,40
	MOT 2	1,94	0,96	0,40	0,13	0,05	0,02	0,00	47,40
	MOT 8	1,05	0,12	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	11,30
	MOT 3	2,84	0,23	0,19	0,04	0,02	0,00	0,00	10,90
	MOT 1	1,55	0,45	0,36	0,08	0,03	0,00	0,00	35,40
	MOT 10	1,03	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	9,40

Finalmente, se realiza la prueba de armónicos con sólo un Microformer por fase, la tabla 4.27 muestra las mediciones tomadas.

Tabla 4.27: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de baja tensión sin MOT's 8 y 10

	MOT	1ra	3ra	5ta	7ma	9na	11va	13va	THD [%]
Tensión [V]	MOT 11	221,90	0,80	3,60	0,80	0,70	0,50	0,50	1,70
	MOT 6	220,80	1,70	3,50	0,50	1,30	1,10	0,40	2,10
	MOT 7	220,80	2,00	4,30	1,20	0,80	0,60	0,60	2,20
	MOT 2	217,60	28,10	10,30	2,50	0,80	0,30	0,20	13,80
	MOT 3	191,20	10,70	7,10	1,50	0,20	0,30	0,20	6,60
	MOT 1	218,80	15,50	10,20	2,10	0,70	0,20	0,20	8,60
Corriente [A]	MOT 11	2,67	0,72	0,04	0,06	0,02	0,00	0,00	26,20
	MOT 6	3,18	0,38	0,07	0,02	0,02	0,00	0,00	12,10
	MOT 7	2,90	0,50	0,06	0,04	0,03	0,02	0,00	16,90
	MOT 2	2,57	0,66	0,36	0,11	0,04	0,00	0,00	28,30
	MOT 3	2,81	0,23	0,20	0,05	0,02	0,00	0,00	10,70
	MOT 1	2,52	0,30	0,28	0,07	0,02	0,00	0,00	16,00

4.3 Simulaciones del modelo de la red experimental en DigSILENT

Las siguientes pruebas son las mismas realizadas en 4.2 con el fin de comparar sus resultados y así poder validar el modelo en DigSILENT para luego realizar estudios específicos en distintos escenarios, no cubiertos en esta sección. El detalle de los flujos de potencia que se obtienen de estas pruebas y las de la sección 4.5 se encuentra en el CD adjunto.

4.3.1 Prueba sin condensadores

Se recrea la prueba 4.2.2 en DigSILENT con todos los condensadores desconectados. Las tablas siguientes muestran los resultados de la prueba cuando los consumos están en circuito abierto, con la carga 1 y con la carga 2 especificados en la tabla 3.8.

Tabla 4. 28: Resultados de la prueba sin condensadores en circuito abierto en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	2,01	86,63	433,25	0,20
	MOT 6	220,0	1,93	85,70	416,88	0,20
	MOT 7	220,0	2,08	98,99	447,16	0,22
Microformers de bajada	MOT 2	221,0	-	-	-	-
	MOT 8	220,7	-	-	-	-
	MOT 3	211,8	-	-	-	-
	MOT 1	223,3	-	-	-	-
	MOT 10	221,7	-	-	-	-

Tabla 4.29: Resultados de la prueba sin condensadores con carga C1 en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	3,29	569,76	446,76	0,79
	MOT 6	220,0	2,30	304,76	304,76	0,60
	MOT 7	220,0	3,26	550,17	550,17	0,77
Microformers de bajada	MOT 2	206,6	0,92	189,60	-	-
	MOT 8	207,2	1,26	260,80	-	-
	MOT 3	200,9	1,05	210,20	-	-
	MOT 1	210,9	1,02	215,00	-	-
	MOT 10	209,5	1,01	212,10	-	-

Tabla 4. 30: Resultados de la prueba sin condensadores con carga C2 en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	4,08	756,50	485,03	0,84
	MOT 6	220,0	3,55	637,23	450,88	0,82
	MOT 7	220,0	4,05	742,00	491,09	0,83
Microformers de bajada	MOT 2	195,7	1,81	356,80	-	-
	MOT 8	202,6	1,24	252,20	-	-
	MOT 3	187,9	2,63	488,70	-	-
	MOT 1	200,9	1,93	386,90	-	-
	MOT 10	203,5	0,98	200,20	-	-

4.3.2 Prueba con condensador en alta

Se realiza la prueba homóloga a 4.2.3 donde se conecta sólo el condensador 3 de la fase *a*. Al igual que en la prueba anterior, se muestran los resultados para los tres niveles de carga propuestos.

Tabla 4.31: Resultados de la prueba con condensador 3 en circuito abierto en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	0,40	84,02	25,15	0,96
	MOT 6	220,0	1,99	80,41	429,41	0,18
	MOT 7	220,0	2,16	102,82	463,78	0,22
Microformers de bajada	MOT 2	230,6	-	-	-	-
	MOT 8	230,3	-	-	-	-
	MOT 3	211,1	-	-	-	-
	MOT 1	226,2	-	-	-	-
	MOT 10	224,6	-	-	-	-

Tabla 4.32: Resultados de la prueba con condensador 3 bajo carga C1 en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	2,78	609,22	62,29	0,99
	MOT 6	220,0	2,32	298,97	413,64	0,59
	MOT 7	220,0	3,32	559,05	469,18	0,77
Microformers de bajada	MOT 2	215,1	1,00	205,40	-	-
	MOT 8	215,7	1,31	282,70	-	-
	MOT 3	200,2	1,04	208,70	-	-
	MOT 1	213,6	1,03	220,60	-	-
	MOT 10	212,2	1,03	217,60	-	-

Tabla 4.33: Resultados de la prueba con condensador 3 bajo carga C2 en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	3,74	814,46	115,52	0,99
	MOT 6	220,0	3,56	631,05	465,35	0,80
	MOT 7	220,0	4,12	754,56	500,43	0,83
Microformers de bajada	MOT 2	204,7	1,88	385,20	-	-
	MOT 8	211,8	1,29	272,50	-	-
	MOT 3	184,9	2,62	483,80	-	-
	MOT 1	203,4	1,95	396,50	-	-
	MOT 10	206,0	1,00	205,20	-	-

4.3.3 Prueba con condensadores en baja

Por último, se simula la prueba llevada a cabo en 4.2.4 con los condensadores 6, 9 y 10 conectados en el lado de baja de los Microformers respectivos. Las tablas siguientes muestran los resultados para los distintos niveles de carga C2 y C3 de la tabla 3.8.

Tabla 4.34: Resultados de la prueba con condensadores en baja en vacío en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	0,36	77,00	19,34	0,97
	MOT 6	220,0	0,95	77,75	193,67	0,37
	MOT 7	220,0	0,90	94,52	174,87	0,48
Microformers de bajada	MOT 2	251,3	-	-	-	-
	MOT 8	232,2	-	-	-	-
	MOT 3	226,5	-	-	-	-
	MOT 1	243,8	-	-	-	-
	MOT 10	231,6	-	-	-	-

Tabla 4.35: Resultados de la prueba con condensadores en baja con carga C1 en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	4,07	870,00	209,25	0,97
	MOT 6	220,0	1,74	328,32	196,60	0,86
	MOT 7	220,0	2,93	598,46	241,51	0,93
Microformers de bajada	MOT 2	216,5	2,52	433,90	-	-
	MOT 8	211,2	1,28	271,10	-	-
	MOT 3	211,0	1,54	231,90	-	-
	MOT 1	226,6	1,59	248,30	-	-
	MOT 10	216,7	1,05	227,00	-	-

Tabla 4.36: Resultados de la prueba con condensadores en baja con carga C3 en DigSILENT

Tipo	MOT	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Potencia reactiva [Var]	factor de potencia
Alimentador trifásico	MOT 11	220,0	4,28	912,10	234,51	0,97
	MOT 6	220,0	3,41	692,43	286,15	0,92
	MOT 7	220,0	3,94	813,63	296,87	0,94
Microformers de bajada	MOT 2	212,4	2,66	466,20	-	-
	MOT 8	209,1	1,27	266,70	-	-
	MOT 3	194,4	2,92	534,70	-	-
	MOT 1	214,2	2,32	439,70	-	-
	MOT 10	209,2	1,01	211,50	-	-

4.4 Análisis de las pruebas de la red experimental y su modelo en DigSILENT

4.4.1 Análisis de resultados

Al incluir condensadores se mejora enormemente la regulación en el sistema, llegando en la mayoría de los casos que se encuentren dentro de la norma. Además, se incrementa el factor de potencia en los transformadores alimentadores siendo su valor cercano a 1 en los casos donde hay presencia de condensadores.

Por otra parte, el condensador de baja presenta una mejor regulación de tensión que el de alta. Sin embargo, el condensador de alta evita que el Microformer asociado se sobrecargue ya que entrega la potencia reactiva justa que dicho Microformer necesita y donde el exceso se va a los Microformers adyacentes, o bien, a la red. Además, el uso de condensadores de alta tensión refuerza el concepto de reutilización de basura electrónica (una de las

motivaciones principales del Microformer como proyecto) al ocupar otro elemento de los microondas aparte del transformador.

En relación a los armónicos, tanto la distorsión armónica (THD) de tensión y corriente se salen de la norma al incluir condensadores para compensar las caídas de tensión. Si bien, los condensadores de alta tensión provocan menos distorsión armónica que los condensadores de baja tensión, su valor está por el doble de lo que establece la norma. Lo mismo ocurre con las armónicas individuales, donde la tercera armónica posee un nivel no despreciable en los casos con condensadores de baja tensión llegando hasta un 20% del valor de la fundamental.

A pesar de las observaciones anteriores, el THD disminuye conforme se aumenta el consumo en los Microformers de bajada y/o cuando se conectan menos Microformers por fase. Esto se puede ver reflejado con el MOT 2, que disminuye su THD de corriente de 47,4% a 28,3 % y de tensión de 20,3% a 13,8% al aumentar la carga del consumo asociado y dejándolo operar en su fase en solitario. Para operar dentro de la norma, se debe proponer implementar un filtro armónico que permita disminuir la distorsión armónica en los puntos de baja tensión de la red.

Por último, la distorsión armónica en vacío está dentro de la norma para la tensión en contraste con lo que ocurre con la corriente donde el THD está levemente por sobre la norma (si considera una corriente de cortocircuito entre 150 y 300 A) en los Microformers de subida, sin embargo este límite puede ser más holgado para sistemas con capacidad de cortocircuito mayor. Este efecto se puede atenuar agregando un enrollado terciario en delta en los Microformers de subida para que las terceras armónicas de corriente circulen por dicho circuito.

4.4.2 Validación del modelo

En esta sección se analizan los resultados de las pruebas realizadas a la red experimental y su modelo en DigSILENT. Las tablas siguientes muestran los errores porcentuales de las pruebas ejecutadas en 4.2 y 4.3, donde el error es calculado según:

$$\epsilon_V = \frac{(V_{sim} - V_{r.e.})}{V_{r.e.}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Con ϵ_V el error porcentual de la tensión, V_{sim} la tensión obtenida en la simulación en DigSILENT y $V_{r.e.}$ la tensión obtenida en las pruebas de la red experimental. Análogamente, el error porcentual de la corriente y de la potencia, respectivamente, es:

$$\epsilon_I = \frac{(I_{sim} - I_{r.p.})}{I_{r.p.}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

$$\epsilon_P = \frac{(P_{sim} - P_{r.p.})}{P_{r.p.}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Tabla 4.37: Errores entre los resultados de las pruebas en vacío de la red y su modelo

Tipo	MOT	Circuito abierto			Carga 1			Carga 2		
		ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]	ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]	ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]
Alimentador trifásico	MOT 11	0,4525	-9,4595	-2,6629	0,0908	2,4922	2,1075	-0,1365	4,0816	1,6801
	MOT 6	0,9901	8,4270	7,1250	0,5874	9,5238	-1,6903	0,8115	5,6548	-2,8613
	MOT 7	0,5874	-0,1510	-9,1835	0,0454	-0,9119	-3,9843	0,0908	-0,4914	-4,3814
Promedio	-	0,6767	-0,3945	-1,5738	0,2412	3,7014	-1,1890	0,2553	3,0817	-1,8542
Desviación estándar	-	0,2797	8,9457	8,2086	0,3007	5,3219	3,0767	0,4950	3,1928	3,1538
Microformers de bajada	MOT 2	0,3607	-	-	0,6731	-0,2174	-1,2500	1,1117	-0,4945	-0,8889
	MOT 8	0,4959	-	-	0,6235	-0,8661	-1,9549	1,3632	-0,9600	-1,4844
	MOT 3	2,0804	-	-	2,9000	-3,1481	-5,3153	1,0532	-2,2305	-4,3640
	MOT 1	1,7165	-	-	1,0788	-0,9709	-2,2727	1,3261	-1,2308	-2,7889
	MOT 10	1,9894	-	-	1,4118	-1,6505	-2,7064	4,2353	-4,4660	-8,1651
Promedio	-	1,3286	-	-	1,3374	-1,3706	-2,6999	1,8179	-1,8764	-3,5383
Desviación estándar	-	0,8341	-	-	0,9307	1,1160	1,5556	1,3579	1,5809	2,9107

Tabla 4.38: Errores entre los resultados de las pruebas con condensador en alta de la red y su modelo

Tipo	MOT	Circuito abierto			Carga 1			Carga 2		
		ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]	ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]	ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]
Alimentador trifásico	MOT 11	0,2268	-84,7328	-21,4766	0,0908	-13,6646	-2,8357	0,1815	-5,5556	-2,4599
	MOT 6	0,5425	13,7143	3,0897	0,6772	11,0048	-2,6156	1,1680	6,5868	-2,9154
	MOT 7	0,0908	-9,2437	-3,0000	0,0454	2,4691	-1,4021	0,3172	1,7284	-2,3855
Promedio	-	0,2867	-26,7541	-7,1290	0,2712	-0,0636	-2,2845	0,5556	0,9199	-2,5869
Desviación estándar	-	0,2317	51,5065	12,7931	0,3524	12,5282	0,7720	0,5347	6,1114	0,2869
Microformers de bajada	MOT 2	3,1906	-	-	1,8704	2,5773	-3,1132	1,3969	-0,9474	-2,4810
	MOT 8	3,3977	-	-	1,6416	-1,5038	-3,1849	1,4884	-1,7557	-2,6786
	MOT 3	2,0418	-	-	2,3415	-2,6168	-5,1364	1,4392	-1,9850	-3,4331
	MOT 1	0,0442	-	-	-1,1843	1,2745	2,6047	0,0491	0,0000	-0,1259
	MOT 10	0,3549	-	-	-0,2836	0,4902	0,7407	0,8662	-1,3861	-1,8182
Promedio	-	1,8058	-	-	0,8771	0,0443	-1,6178	1,0480	-1,2149	-2,1074
Desviación estándar	-	1,5585	-	-	1,5258	2,0980	3,1806	0,6123	0,7846	1,2483

Tabla 4.39: Errores entre los resultados de las pruebas con condensadores en baja de la red y su modelo

Tipo	MOT	Circuito abierto			Carga 1			Carga 2		
		ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]	ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]	ϵ_V [%]	ϵ_I [%]	ϵ_P [%]
Alimentador trifásico	MOT 11	0,4074	-87,8788	-52,4691	0,3172	26,0062	33,8462	0,1362	1,1820	1,1197
	MOT 6	0,7668	-40,2516	-12,6404	0,4975	-6,9519	-2,2857	0,1362	4,6012	-0,2262
	MOT 7	0,5874	-60,5263	-19,2137	-0,0910	-4,5603	-1,5691	0,2268	-0,7557	-1,9723
Promedio	-	0,5872	-62,8856	-28,1078	0,2412	4,8314	9,9971	0,1664	1,6759	-0,3596
Desviación estándar	-	0,1797	23,9011	21,3520	0,3015	18,3769	20,6570	0,0523	2,7124	1,5503
Microformers de bajada	MOT 2	4,1937	-	-	4,2035	-8,1022	-8,2664	-2,7576	0,3396	4,2953
	MOT 8	0,9386	-	-	1,2623	-0,6977	-1,7754	-1,2591	-0,7813	1,0227
	MOT 3	2,3286	-	-	2,4503	-8,6310	-4,9590	-0,2579	-0,2389	0,6968
	MOT 1	0,6115	-	-	-0,9804	-4,4578	1,3469	-0,4219	-0,8120	1,0805
	MOT 10	0,0432	-	-	-0,4171	0,7692	1,7937	0,4284	0,0990	-0,7042
Promedio	-	1,6231	-	-	1,3037	-4,2239	-2,3720	-0,8536	-0,2787	1,2782
Desviación estándar	-	1,6654	-	-	2,1156	4,2392	4,2713	1,2221	0,5156	1,8354

Se puede observar, en las tablas anteriores, que los errores en las variables asociadas a los Microformers de bajada son mínimos llegando a un promedio del 4% en el peor de los casos, con una desviación estándar de 4 puntos porcentuales. Además, el error se reduce al aumentar el nivel de carga. Es decir, mientras mayor sea el consumo de potencia menor es la diferencia entre los resultados empíricos con los del modelo.

En contraste, el modelo presenta severas diferencias con lo medido en la red experimental llegando hasta un 87% de error con los valores empíricos. Esto se puede explicar por dos fenómenos: el primero consiste en que en el modelo se ocupó un alimentador trifásico, donde se asume que los 3 Microformers son idénticos siendo sus parámetros el promedio de los MOT's 6, 7 y 11, por ende, existe un error asociado a las corrientes que circulan por cada fase.

Tabla 4.40: Errores entre los MOT's de subida y el MOT 3F

MOT	Error corriente de excitación [%]	Error de pérdidas en circuito abierto [%]	Error de tensión en cortocircuito [%]	Error de pérdidas en cortocircuito [%]
MOT 6	28,57	-2,02	2,32	-2,38
MOT 7	-2,17	4,30	5,47	5,13
MOT 11	-16,67	-2,02	-6,94	-2,38

La tabla 4.40 muestra el error de los parámetros de cada Microformer perteneciente al alimentador con respecto al valor promedio de los tres Microformers. Se observa que el MOT 7 es el que más cerca está del Microformer "promedio" y es el que precisamente posee un menor nivel de error bajo carga. Al igual que los Microformers de bajada el error de los Microformers alimentadores baja a niveles aceptables. Sin embargo el problema se encuentra cuando el sistema está en circuito abierto donde los niveles son elevados. Esto da paso a analizar el segundo fenómeno que altera los resultados: el nivel de armónicos. Los mayores errores se obtienen cuando están los condensadores conectados junto con cargas bajas, donde la presencia de terceras armónicas es predominante, explicando así, la diferencia entre los datos.

En conclusión, el modelo puede ser ocupado para analizar con precisión el comportamiento de la red experimental cuando se trabaja con un nivel de carga alto en los consumos.

4.5 Simulación y análisis del modelo de red experimental en DigSILENT

4.5.1 Descripción

En esta sección se simulan distintos escenarios para complementar las pruebas realizadas en las secciones anteriores y cubrir casos de interés que no pueden ser llevadas a cabo en la red experimental física del laboratorio. Primero se parte con un caso base que sirve como guía para analizar escenarios más complejos, para luego dar algunas recomendaciones y observaciones sobre el comportamiento del Microformer.

4.5.2 Caso Base

El caso base es similar al analizado en 4.2.2 con los mismos parámetros ahí especificados salvo los niveles de carga en los consumos que son levemente distintos. La tabla 4.41 muestra la potencia nominal de las cargas utilizadas, siendo modeladas como cargas de impedancia constante. El valor de las nuevas cargas tiene por objetivo nivelar los consumos en las líneas para cubrir un mayor número de casos y así facilitar el análisis de los resultados.

Tabla 4.41: Potencia nominal de los consumos del caso base

Consumo	P_{nom} [W]
Carga 6	450
Carga 8	300
Carga 9	650
Carga 10	450
Carga 12	300

La figura 4.6 muestra la red utilizada junto con el flujo de potencia resultante. Los niveles de tensión son muy bajos en todas las barras, siendo el principal responsable de dicho fenómeno el consumo de reactivos de los Microformers, en especial el relacionado al banco trifásico que producto de su sobrecarga la caída tensión llega a un 10%.

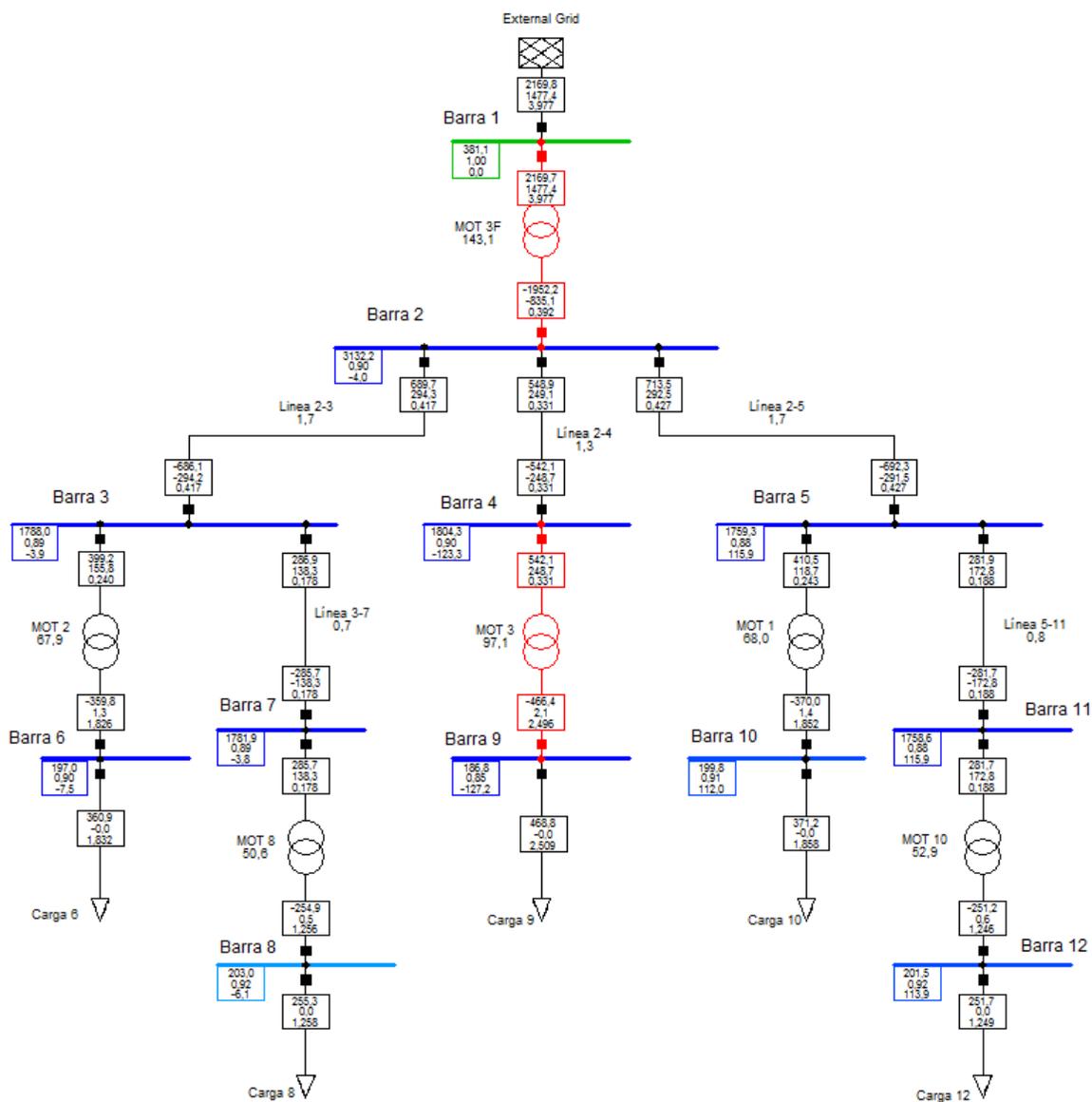


Figura 4.6: Flujo de potencia del caso base

4.5.3 Caso 1: Microformers alimentadores en paralelo

Para mejorar el nivel de tensión en la red y de paso descongestionar el alimentador principal, se agregan 2 Microformers en paralelo por cada fase quedando un total de 3 Microformers trifásicos en paralelo. La figura 4.7 muestra el flujo de potencia de la red, donde los niveles de tensión en el sistema se elevan en 6 puntos porcentuales, estando todas las barras dentro la norma vigente para zonas rurales. Al disponer de transformadores en paralelo la capacidad de corriente del alimentador trifásico aumenta, por lo que existen menos pérdidas por flujo de fuga al distribuirse la corriente entre los Microformers que conforman el alimentador. Sin embargo, su consumo de reactivos aumenta enormemente pasando de 1477 Var a 2517 Var donde la red debe encargarse de suplir dichos consumos llegando a un factor de potencia promedio en el lado de baja del alimentador de 0,7.

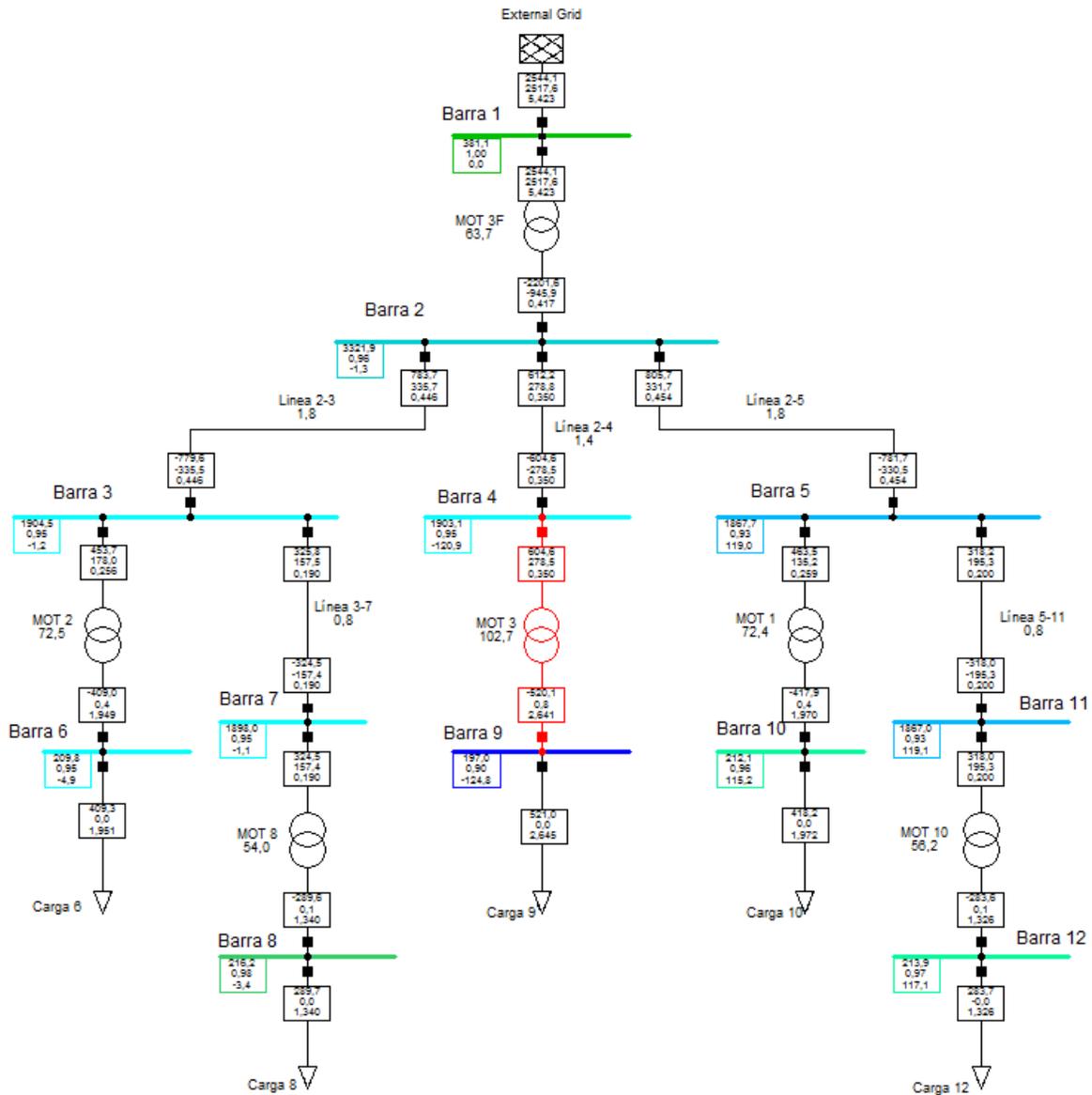


Figura 4.7: Flujo de potencia con Microformers de subida en paralelo

La incorporación de Microformers en paralelo permite mejorar los niveles de tensión en el sistema. Sin embargo, lograr esto en la práctica es difícil debido a que se debe conseguir 3 Microformers por fase con parámetros eléctricos lo más idéntico posible para evitar la circulación de corriente entre los mismos Microformers, se podría minimizar el error eligiendo microondas de la misma marca y modelo.

Por otra parte, como el consumo de reactivos es muy grande puede no ser conveniente el uso de Microformers como alimentador principal. En base a lo anterior, se propone hasta 3 Microformers por fase para ser usados como alimentador principal, esto equivale a una potencia nominal trifásica de 6 kVA.

En la práctica, puede ser difícil implementar un Microformer alimentador ya que en una comunidad con baja densidad poblacional tenga un punto de acceso relativamente cerca (<15 km) de 220 V. Esto abre la opción de usar un transformador industrial que entregue una tensión de 2 kV, cuyos parámetros están diseñados de manera tal que se puede

despreciar la rama shunt de su modelo eléctrico a diferencia del Microformer que originalmente está diseñado para otros fines. En resumen, se recomienda un transformador industrial cuando la potencia sea mayor a 6 kVA y/o se tenga un punto de acceso distinto a 380 V_{ff} .

4.5.4 Caso 2: Condensadores óptimos en alta

Para mejorar los niveles de tensión, también se puede compensar reactivos mediante la incorporación de condensadores en alta. Estos condensadores permiten regular la tensión en los Microformers de bajada pero también permiten mejorar la tensión en bornes del alimentador trifásico.

4.5.4.1 Cálculo de compensación de Microformers de subida

Para fijar un nivel de tensión en el lado de alta se debe calcular la tensión en vacío del Microformer trifásico, De las ecuaciones (2.47) correspondientes a las del tetrapolo asociado al Microformer, se tiene:

$$V_2 = \frac{V_1}{1 + \frac{Z_{eq}}{2} Y_m} - \frac{Z_{eq} + \frac{Z_{eq}^2}{4} Y_m}{1 + \frac{Z_{eq}}{2} Y_m} I_2 \quad (4.5)$$

Con $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ e $Y_m = \frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{jX_m}$ definidos por los parámetros calculados en 4.1.3.1. Como en vacío la corriente $I_2 = 0$, se tiene que:

$$V_{2,CA} = \frac{V_1}{1 + Z_{eq} Y_m} \quad (4.6)$$

La tabla 4.9 muestra los valores de los parámetros promedio de los Microformers de subida. Al reemplazarlos en (4.5) se obtiene la tensión en vacío del alimentador trifásico, ésta es $|V_{2,CA}| = 0,9867 pu$.

De la ecuación (2.53) referida a la regulación de tensión considerando admitancias, se puede calcular la potencia activa máxima que se puede transmitir por el Microformer trifásico y la potencia reactiva que se debe suministrar para poder mantener la tensión en el valor antes calculado. Dicha ecuación describe una circunferencia con una serie de combinaciones posibles para P_2 y Q_2 , sin embargo, en el Microformer ambas variables deben cumplir que:

$$P_2^2 + Q_2^2 \leq S_{nom}^2 \quad (4.7)$$

Dicha ecuación se maximiza cuando se impone la igualdad. Luego, Q_2 se puede escribir en función de P_2 como:

$$P_2 = \sqrt{S_{nom}^2 - Q_2^2} \quad (4.8)$$

Expresado en pu queda:

$$P_2 = \sqrt{1 - Q_2^2} \quad (4.9)$$

Considerando $V_1 = 1 pu$ y $V_2 = V_{2,CA}$, la ecuación (2.53) queda:

$$\left(\sqrt{1 - Q_2^2} + \frac{A}{B} V_{2,CA} \cos(\beta - \alpha) \right)^2 + \left(Q_2 + \frac{A}{B} V_{2,CA} \sin(\beta - \alpha) \right)^2 = \left(\frac{V_{2,CA}}{B} \right)^2 \quad (4.10)$$

Con:

$$A \angle \alpha = 1 + \frac{Z_{eq}}{2} Y_m \quad (4.11)$$

$$B \angle \beta = Z_{eq} + \frac{Z_{eq}^2}{4} Y_m \quad (4.12)$$

Resolviendo la ecuación (4.10) se tiene que $Q_2 = -0,44 pu$ y, por lo tanto, $P_2 = 0,898 pu$. Es decir, para mantener el alimentador trifásico en una tensión igual a la que se tendría en circuito abierto, de los 660 VA que puede consumir el Microformer por fase se debe transmitir 592,7 W a los consumos y 290,4 Var deben ser compensados.

4.5.4.2 Consumo de reactivos en los Microformers de bajada

Para determinar el número de condensadores en alta por fase, también es necesario estimar el consumo de reactivos de los Microformers. Una buena aproximación es considerar el consumo de reactivos de los Microformers en las pruebas en vacío y de cortocircuito. De las tablas 4.6 y 4.7 se puede obtener los consumos de potencia reactiva por medio de las ecuaciones siguientes:

$$Q_{CA} = \sqrt{(V_{nom} I_{CA})^2 - P_{CA}} \quad (4.12)$$

$$Q_{CC} = \sqrt{(V_{CC} I_{nom})^2 - P_{CC}} \quad (4.13)$$

Con esto, la potencia reactiva que consumen los Microformers es la suma entre la potencia reactiva de circuito abierto y la de cortocircuito. La tabla 4.39 muestra el consumo de reactivos de cada Microformer de bajada cuando están a plena carga.

Tabla 4.42: Consumo de reactivos de los Microformers de bajada

MOT	Q_{CA} [Var]	Q_{CC} [Var]	Q_{total} [Var]
MOT 1	105,88	69,46	175,34
MOT 2	150,19	72,66	222,85
MOT 3	262,32	57,96	320,28
MOT 8	144,52	62,69	207,21
MOT 10	187,12	57,95	245,07

A partir de la tabla anterior, se puede simular distintos escenarios para poder concluir la cantidad de condensadores que se requieren por fase.

4.5.4.3 Caso 2.1: Simulación del caso base con condensadores en alta

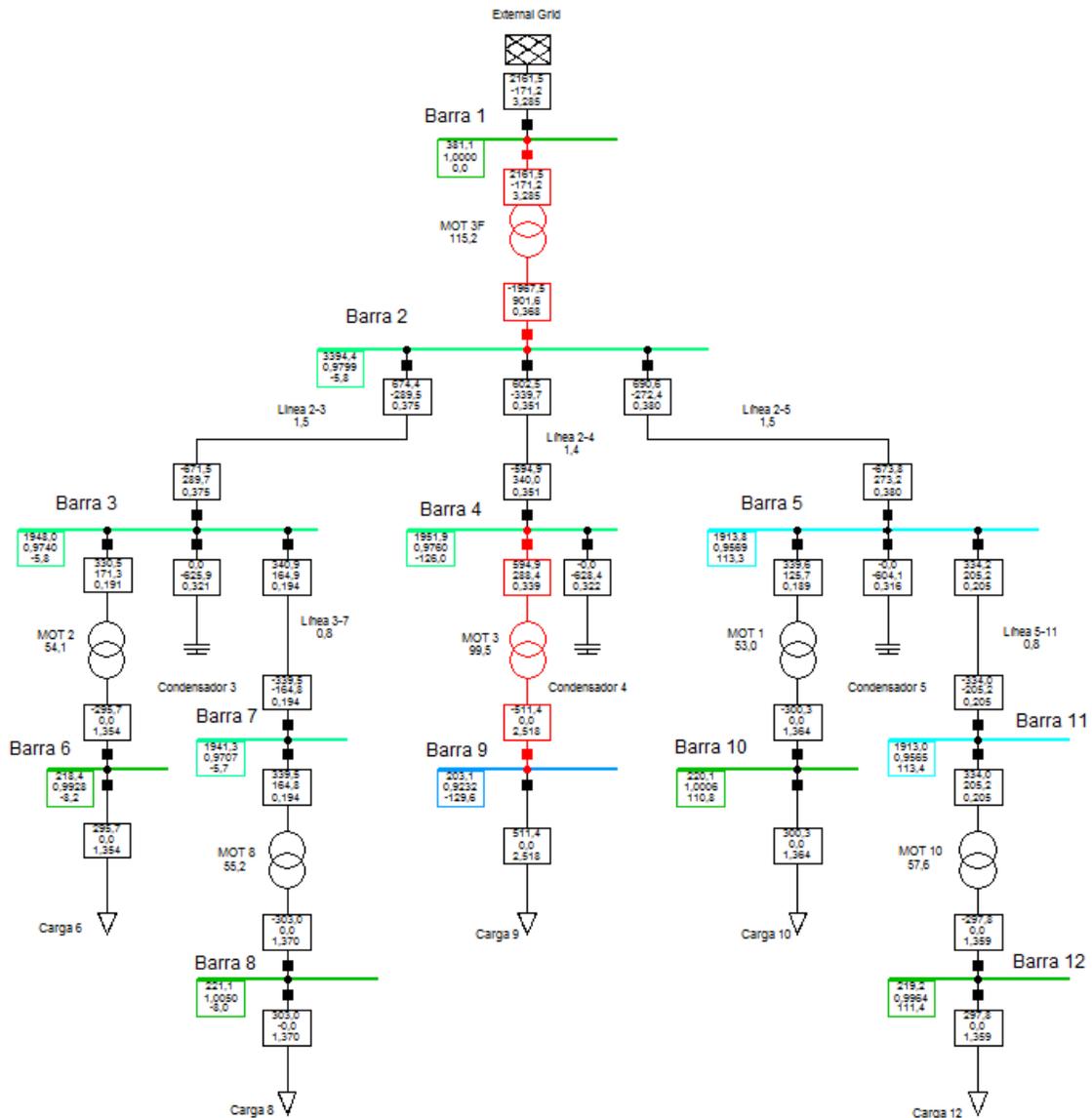


Figura 4.8: Flujo de potencia del caso base con condensadores en alta

El alimentador trifásico debe ser compensado con 290 Var por fase y por Microformer para tener una tensión $V_2=0,9867 pu$ en el lado de alta. La tabla 4.40 muestra el consumo de potencia reactiva en la red por fase, donde $Q_{consumido}$ es la potencia reactiva que consumen los Microformers por fase a plena carga y $Q_{alimentador}$ es la potencia reactiva a compensar por fase del Microformer trifásico.

Tabla 4.43: Consumo total de reactivos en la red por fase a plena carga

Fase	$Q_{consumido}$ [Var]	$Q_{alimentador}$ [Var]	Q_{total} [Var]
a	430,06	290	720,06
b	222,85	290	512,85
c	420,41	290	710,41

Por otra parte, cada condensador de alta es capaz de entregar 1300 Var a esa tensión. Como el Q_{total} requerido es más bajo, se necesitan 2 condensadores en serie por fase para disminuir la entrega de reactivos, de lo contrario se estarían entregando un exceso grande de reactivos a la red, sobrecargando el alimentador trifásico.

La figura 4.8 muestra el flujo de potencia. A diferencia del caso base se consideró un consumo de potencia en las cargas de los Microformers de 300 W nominal en los MOT 1 y 2, y el MOT 3 con potencia nominal de 600 W .

Los niveles de tensión mejoran enormemente, llegando a valores nominales en el lado de baja exceptuando el MOT 3 que, debido a sus parámetros, presenta una tensión más baja que los demás.

4.5.4.4 Caso 2.2: Simulación de alimentador trifásico en paralelo con compensación

Como el alimentador trifásico debe ser compensado con 290 Var por fase y por Microformer, entonces se debe compensar un total de 870 Var por fase para tener una tensión $V_2=0,9867 pu$. Por otra parte, el alimentador debe estar cerca de su capacidad nominal para que estos valores sean consistentes con los cálculos realizados anteriormente, por lo que se debe aumentar el nivel de carga en los consumos. Como los Microformers no pueden sobrepasar de los 600 W se debe incluir un tercer Microformer por fase o tener Microformers de bajada de las mismas características en paralelo.

La tabla 4.44 muestra los consumos agregados para lograr consumir cerca de 1500 W , donde se ha agregado un Microformer en la fase a con los mismos parámetros del MOT 3 y dos Microformers en paralelo en la fase b con los mismos parámetros del MOT 1. Además, el MOT 10 de la fase c se dejó en paralelo con otro de sus mismas características.

Tabla 4.44: Potencia nominal de los consumos nuevos

Carga	Fase	Potencia nominal [W]
Carga 6	a	500
Carga 8	a	600
Carga 14	a	400
Carga 9	b	400
Carga 13	b	1000
Carga 10	c	500
Carga 12	c	1000

La tabla 4.45 muestra la potencia reactiva consumida por fase debido a los Microformers y la potencia reactiva que debe ser compensada al alimentador.

Tabla 4.45: Potencia reactiva consumida por fase en la red

Fase	$Q_{consumido}$ [Var]	$Q_{alimentador}$ [Var]	Q_{total} [Var]
a	692,38	870	1562,38
b	434.61	870	1304.61
c	607.53	870	1477.53

En base a lo anterior se debe ocupar sólo un condensador en cada fase. Aun así los condensadores no lograrían suplir la compensación, por lo que la tensión de la red debiese caer. En efecto, la figura 4.9 muestra el flujo de potencia del sistema en estudio, donde los niveles de tensión caen entre 2 y 5 puntos porcentuales en comparación con el caso anterior por diferentes motivos. El primero de ellos es lo que ya se anunció anteriormente, que debido a la capacidad de los condensadores no es la adecuada no se logra cumplir con la cuota de reactivos para la compensación, lo que deriva en una caída de tensión en la red. La segunda causa de la caída de tensión es la capacidad de la línea, si bien las líneas están lejos de estar saturadas, existe una caída de tensión importante en ellas dado el nivel de carga de los consumos ya que éstas transmiten casi el triple de corriente de la que se previó.

Para solucionar los problemas anteriores, se puede considerar un cable de un espesor más grueso que 14 *AWG* o disminuir las distancias consideradas anteriormente. Por otro lado, como cada Microformer viene con un condensador propio se puede hacer arreglo de ellos por fase colocando dos en serie y éstos en paralelo con un tercero para poder conseguir 2000 *Var* y así mejorar la tensión en el sistema a costa de sobrecargar el alimentador trifásico.

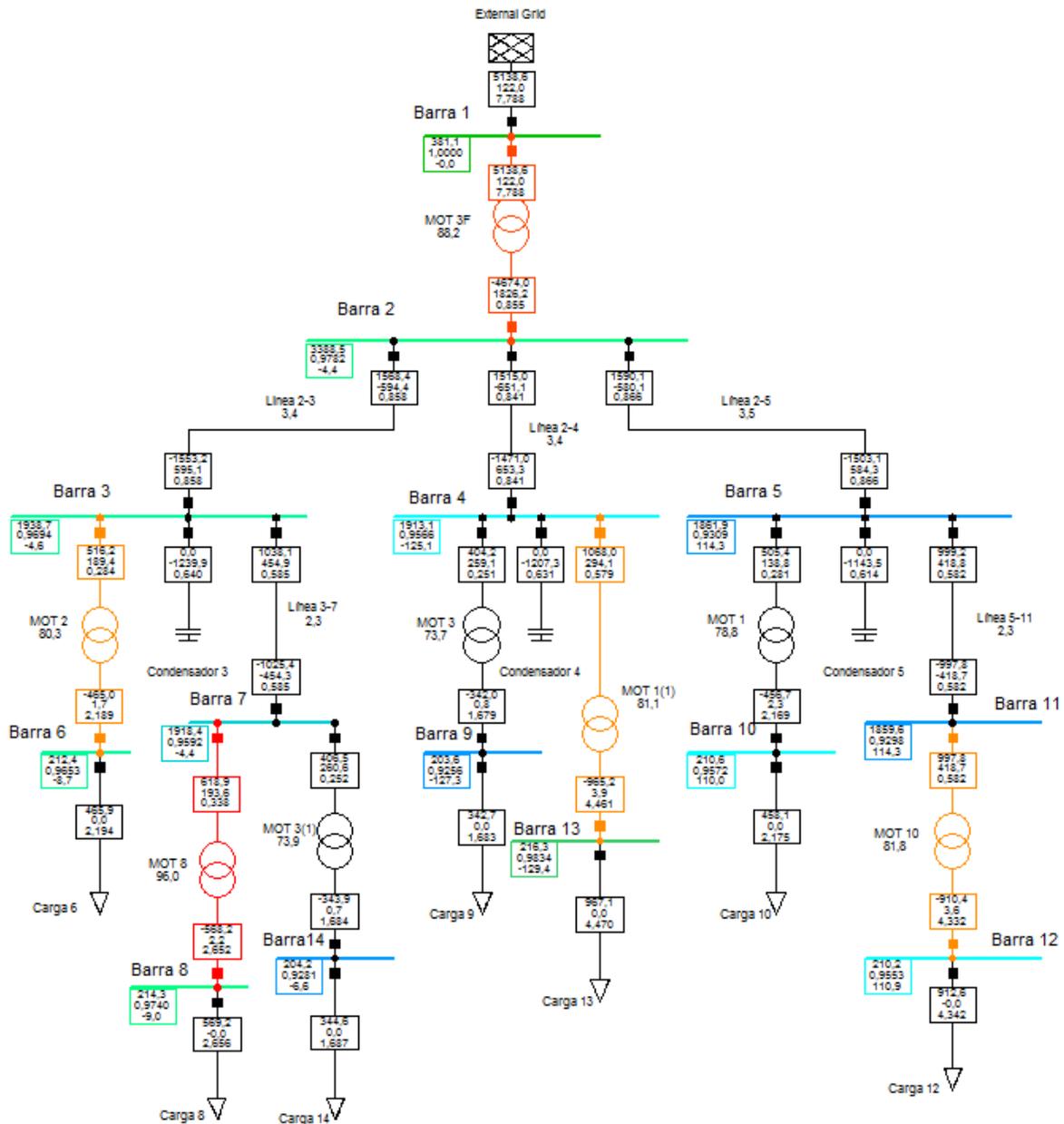


Figura 4.9: Flujo de potencia con Microformers trifásicos en paralelo y condensadores

4.5.4.5 Caso 2.3: Simulación con alimentador industrial

Al caso anterior se reemplaza el alimentador compuesto por Microformers por uno de parámetros industriales, dichos parámetros son los que usa el transformador de 4kV del de 34 nodos de la IEEE especificados en 2.6.2. En dicho transformador se deprecia la rama paralela del modelo exacto del transformador y donde la impedancia tiene un fuerte efecto inductivo.

La figura 4.10 muestra el flujo de potencia de la simulación incluyendo este transformador industrial, donde se compensó con 2 condensadores por fase para suplir el consumo de reactivos de los Microformers. Se observa que el nivel de tensión en las barras está dentro

de la norma chilena incluso para zonas urbanas ($\pm 7,5\%$), esto se debe a la baja impedancia serie del transformador industrial que permite tener un nivel de tensión en alta cercana a la nominal.

Con el transformador industrial se logra reducir el consumo de potencia activa en casi 600 W si se compara con el Microformer trifásico. Sin embargo, en la práctica puede resultar económicamente inviable tener un transformador industrial de 2kV debido a que son poco comercializados en distribución por lo que se debe medir el costo/beneficio de optar por esta tecnología.

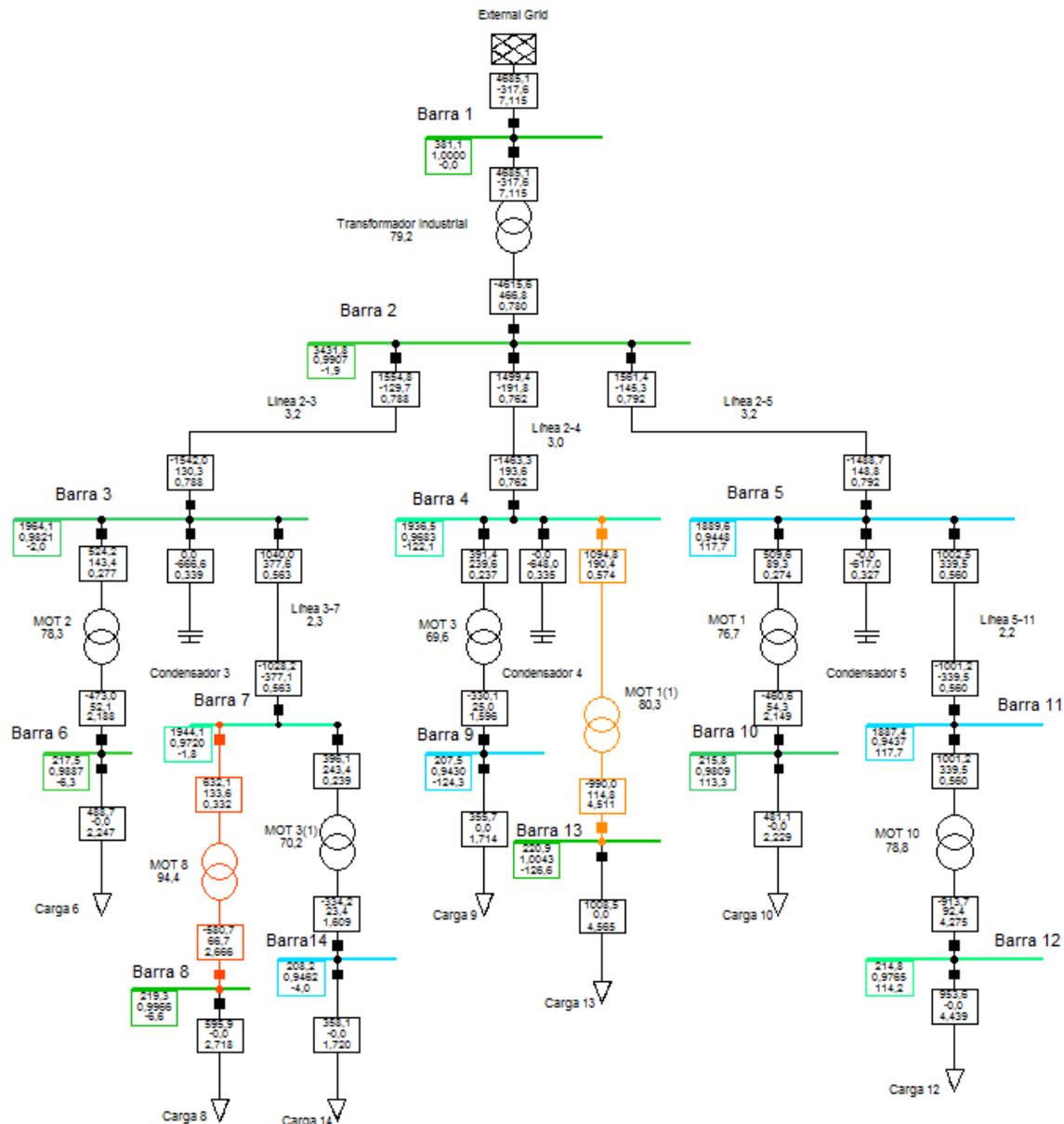


Figura 4.10: Flujo de potencia con transformador industrial y compensación

4.5.5 Caso 3: Generación distribuida

A la simulación 4.5.4.4 correspondiente al Microformer trifásico en paralelo con condensadores en alta se le agregan pequeños centros de generación, específicamente una fuente generadora por fase.

Se modifican algunas líneas de transmisión para que los consumos queden distantes unos de otros. La tabla 4.46 muestra el largo de las líneas para esta prueba.

Tabla 4.46: Largo de líneas para el caso 3

Línea	Fase	Largo [km]
Línea 2-3	a	2,5
Línea 3-7	a	10,0
Línea 2-4	b	7,5
Línea 2-5	c	4,0
Línea 5-11	c	10,0

Los centros de generación aparte de entregar potencia activa cumplen una función de regulación de tensión en las barras respectivas, sus posiciones en la red son elegidas para analizar el efecto en los distintos Microformers disponibles. La tabla 4.47 muestra las potencias que entrega cada centro de generación junto a la tecnología asociada, el número adjunto tiene relación con la barra a la que están conectados.

Tabla 4.47: Fuentes de generación

Generación	fase	Potencia [W]
PV 14	a	800
Diésel 9	b	600
PV 10	c	800

La figura 4.11 muestra el flujo de potencia del presente caso. Los niveles de tensión en las barras mejoran llegando a niveles cercanos al nominal a excepción de la barra 14 la que está asociada al MOT 3 que tiene una impedancia serie alta. Sin embargo, si se inyecta potencia por el lado de baja en ese tipo de Microformer, como en la barra 9, mejora considerablemente los niveles de tensión de las barras adyacentes, además el consumo de reactivos para la regulación de tensión es menor en comparación con las otras fuentes de generación, esto se debe a que tiene una razón de transformación más alta. Sin embargo, los Microformers que tienen parámetros del MOT 3 están casi al límite de su capacidad donde podría alcanzar temperaturas altas dadas por la prueba de calentamiento en 4.2.1. Lo anterior da paso a sustituir el MOT 3 por uno de los MOT's de subida, se elige el MOT 11 que es el que tiene la razón de transformación más baja de los tres.

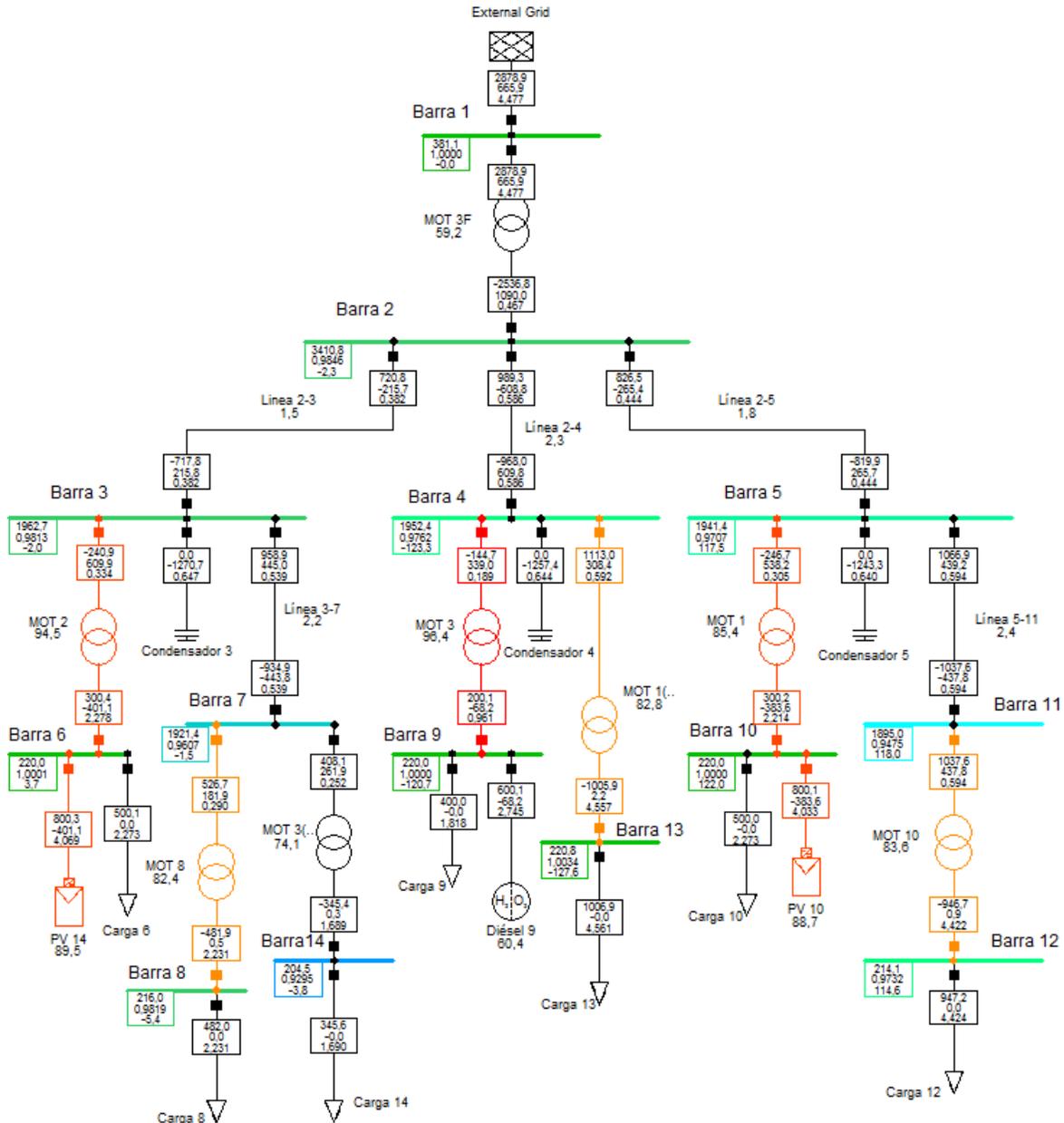


Figura 4.11 Flujos de potencia con generación distribuida

La figura 4.12 muestra el flujo de potencia del mismo caso anterior pero con el MOT 11 en reemplazo del MOT 3. Los resultados muestran que la inyección de potencia en el MOT 711 presenta un mejor desempeño similar a su antecesor, con la diferencia que inyecta reactivos a la red en vez de consumirlos debido a que su razón de transformación es mayor. Con esto se recomienda usar Microformers con razón de transformación parecida a los Microformers pertenecientes a la barra slack ya que necesitan una menor regulación de tensión y por lo tanto el sistema requiere menor consumo de reactivos.

En contraste, si se usa el MOT 11 sólo como transformador de bajada (como en la barra 14) la tensión disminuye producto de su alta razón de transformación. Luego, es recomendable usar Microformers con alta razón de transformación si y sólo si se tiene una fuente de generación asociada. Para el resto de los casos, es útil usar Microformers con razones de transformación pequeñas para que la tensión esté en valores nominales.

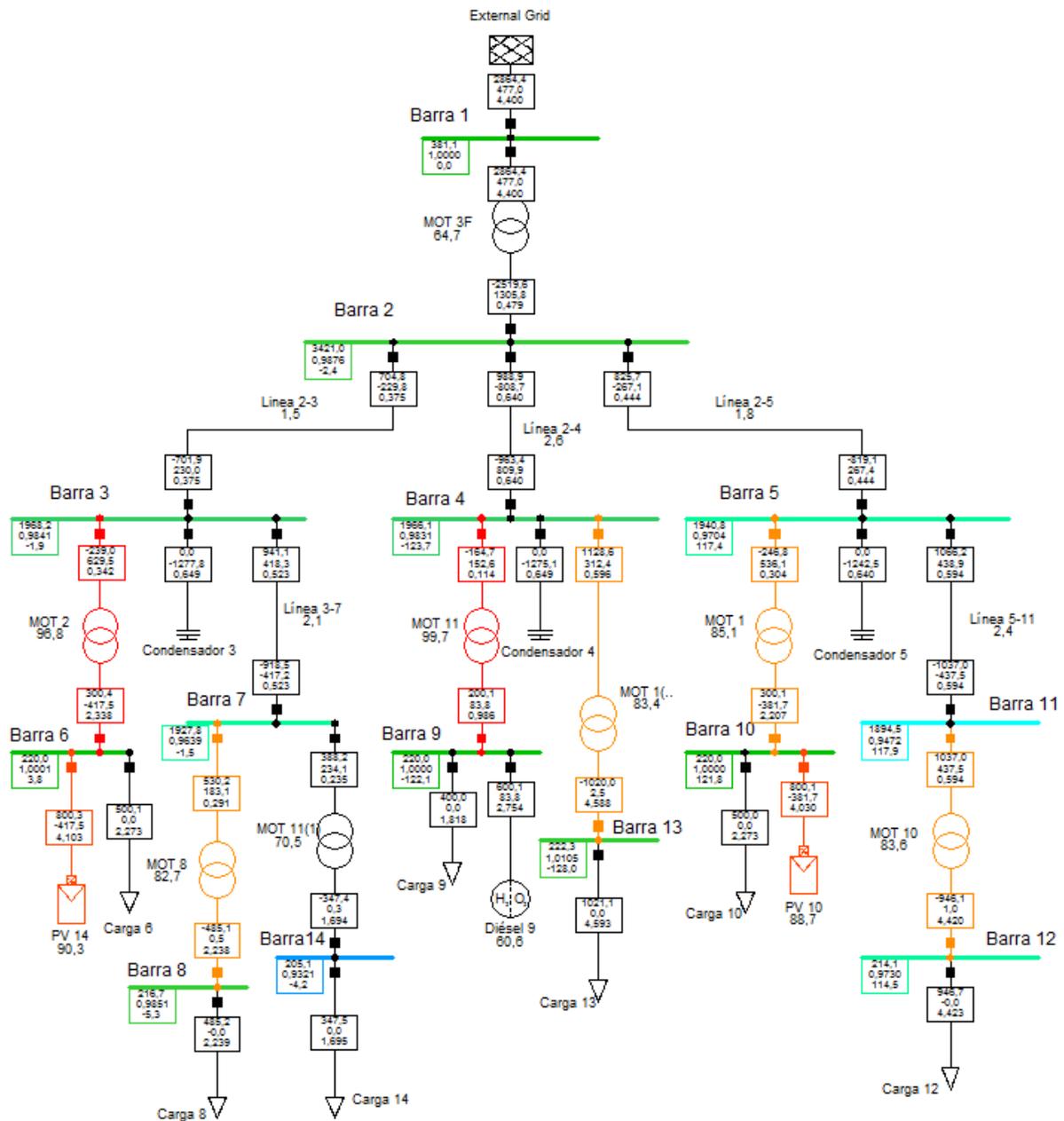


Figura 4.12: Flujos de potencia con MOT 11 en generación distribuida

4.5.6 Caso 4: Red aislada

Al caso anterior, se reemplaza la red infinita por un generador estático trifásico que puede corresponder a un generador diésel encargado de entregar/consumir la potencia activa y reactiva requerida en el sistema. Además, se reemplazan todos los Microformers que tienen generación por los parámetros del MOT 11. También se ponen algunos Microformers en paralelo y se modifica la carga en los consumos. Todo esto es resumido en la tablas 4.45 y 4.49.

Tabla 4.48: Microformers usados para el caso 4

MOT	Fase	Microformers en paralelo
MOT 11(2)	a	2
MOT 8	a	2
MOT 11(1)	a	1
MOT 11	b	2
MOT 1	b	1
MOT 11(3)	c	2
MOT 10	c	2

Tabla 4.49: Consumo y generación de potencia reactiva

Consumo/Generación	Fase	P_{nom} [W]
PV 6	a	900
Carga 8	a	1000
Carga 14	a	500
Eólico 14	a	300
Carga 9	b	1000
Diésel 9	b	1200
Carga 13	b	500
Carga 10	c	500
PV 10	c	1200
Carga 12	c	1000

La figura 4.13 muestra el flujo de potencia del sistema aislado de la red eléctrica. Se observa que las tensiones en el lado de alta decaen debido a que existen distintos niveles de tensión impuestos por los MOT's 11 donde la razón de transformación es más baja que el Microformer trifásico y posee una impedancia serie más elevada lo que provoca una caída de tensión mayor, además el generador estático no posee una gran influencia en la red salvo por el consumo del exceso de reactivos. Sin embargo, los niveles de tensión en el lado de baja en los Microformers se encuentran dentro de la norma para zonas rurales.

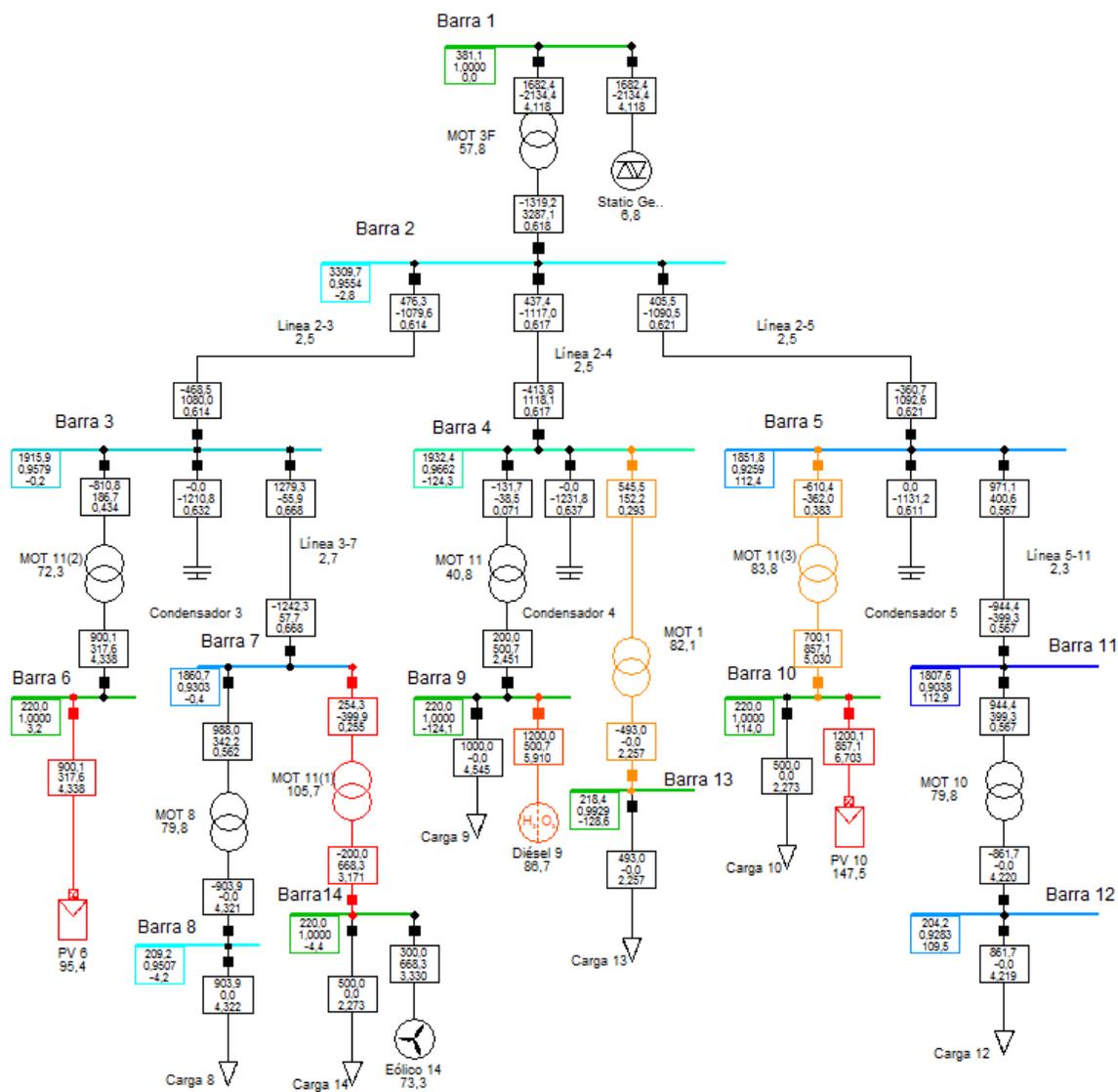


Figura 4.13: Flujo de potencia para la red experimental aislada

4.5.7 Observaciones generales

Como observación general los Microformers con consumos cercanos a la potencia nominal y que poseen baja razón de transformación ($< 8,5$), el lado de baja se encuentra por sobre 2 puntos porcentuales con respecto a lado de alta (referido a 2 kV). Como la norma técnica permite una variación normal de la tensión entre $\pm 7,5\%$ con respecto al valor nominal para zonas urbanas y de $\pm 10\%$ en zonas rurales, se puede fijar una tensión mínima en bornes de alta de los Microformers de $0,91$ en zonas urbanas y $0,88$ en zonas rurales.

La tabla 4.52 muestra los largos máximos de línea por Microformer dependiendo del tipo de conductor utilizado y de la tensión en bornes de alta del alimentador principal a plena carga, dicho largo es inversamente proporcional a los Microformers existentes en la línea. Se consideró cobre, aluminio y acero para los cálculos. La tabla 4.50 muestra las resistividades de dichos materiales y la tabla 4.51 las secciones de cables de 14, 18 y 22 AWG. Ocupando la ecuación (3.3) más la ecuación (4.13) se puede determinar los largos máximos.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (4.13)$$

Tabla 4.50: Resistividad de conductores

Cobre [$\Omega \cdot m$]	Aluminio [$\Omega \cdot m$]	Acero [$\Omega \cdot m$]
$1,71 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$7,85 \cdot 10^{-8}$

Tabla 4.51: Sección transversal de conductores

	14 AWG	18 AWG	20 AWG
Área [mm^2]	2,08	0,823	0,326

Tabla 4.52: Largos máximos de línea por Microformer

Tipo de sistema	Tensión alimentador [pu]	Largo máximo en cobre [km]			Largo máximo en aluminio [km]			Largo máximo en acero [km]		
		14 AWG	18 AWG	22 AWG	14 AWG	18 AWG	22 AWG	14 AWG	18 AWG	22 AWG
Urbano	1,00	66,3	26,3	10,4	40,2	15,9	6,3	14,5	5,7	2,3
	0,99	59,0	23,3	9,2	35,8	14,2	5,6	12,8	5,1	2,0
	0,98	51,6	20,4	8,1	31,3	12,4	4,9	11,2	4,4	1,8
	0,97	44,2	17,5	6,9	26,8	10,6	4,2	9,6	3,8	1,5
Rural	1,00	88,5	35,0	13,9	53,6	21,2	8,4	19,3	7,6	3,0
	0,99	81,1	32,1	12,7	49,2	19,5	7,7	17,7	7,0	2,8
	0,98	73,7	29,2	11,6	44,7	17,7	7,0	16,1	6,4	2,5
	0,97	66,3	26,3	10,4	40,2	15,9	6,3	14,5	5,7	2,3

Por otra parte, también debe existir un largo mínimo para que la instalación de Microformers tenga sentido. Esta viene dada por las pérdidas en los conductores cuando se transmite en 220 V en contraste a las pérdidas obtenidas en los Microformers. En potencia activa los Microformers no consumen más de 80 W y reactiva en promedio 220 Var lo que da una potencia aparente $|S| = 235 VA$. Si se considera una pérdida equivalente a 240 W en los conductores se puede determinar el largo mínimo a considerar para instalar Microformers.

La tabla 4.50 muestra los largos mínimos al usar los mismos conductores de la tabla anterior con tal que produzcan pérdidas de 240 W o que provoque caídas de tensión en el límite de la norma cuando circula una corriente de 3 A.

Tabla 4.53: Largo mínimo de línea

Tipo de sistema	Tensión alimentador [pu]	Largo máximo en cobre [km]			Largo máximo en aluminio [km]			Largo máximo en acero [km]		
		14 AWG	18 AWG	22 AWG	14 AWG	18 AWG	22 AWG	14 AWG	18 AWG	22 AWG
Urbano	1,00	0,80	0,32	0,13	0,49	0,19	0,08	0,17	0,07	0,03
	0,99	0,71	0,28	0,11	0,43	0,17	0,07	0,16	0,06	0,02
	0,98	0,62	0,25	0,10	0,38	0,15	0,06	0,14	0,05	0,02
	0,97	0,54	0,21	0,08	0,32	0,13	0,05	0,12	0,05	0,02
Rural	1,00	1,07	0,42	0,17	0,65	0,26	0,10	0,23	0,09	0,04
	0,99	0,98	0,39	0,15	0,59	0,24	0,09	0,21	0,08	0,03
	0,98	0,89	0,35	0,14	0,54	0,21	0,08	0,19	0,08	0,03
	0,97	0,80	0,32	0,13	0,49	0,19	0,08	0,17	0,07	0,03

4.6 Incorporación del Microformer en red IEEE

El Subcomité de Análisis de Sistemas de Distribución de la IEEE desarrolló y publicó información de varios alimentadores de prueba de distribución radial desequilibrada. El objetivo de dicha publicación es poner a disposición un conjunto común de datos que puedan ser usados por desarrolladores de programas y usuarios con el fin de verificar la exactitud de sus datos. [17]

El alimentador de prueba de 34 nodos es un alimentador localizado actualmente en Arizona, con una tensión nominal de 24.9kV. Se caracteriza por ser extenso y levemente cargado, posee dos reguladores en línea, un transformador de bajada de 4,16kV, cargas desequilibradas y un capacitor en derivación. [18]

Se inserta el Microformer en esta red para implementar las consideraciones obtenidas en las secciones anteriores y observar el impacto que tiene en una red grande.

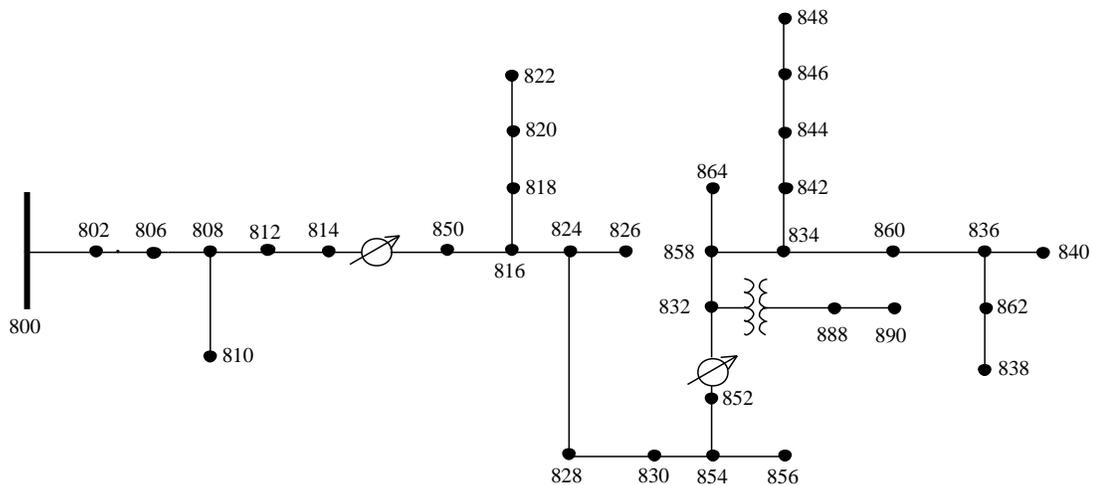


Figura 4.14: Modelo de red IEEE 34 nodos

La red modelo IEEE (para más detallar ver anexo A) se implementa en DigSILENT. Dicha red posee un transformador de 24,9/4,16 kV entre los nodos 832 y 888 (figura 4.14). Como los Microformers trabajan a una tensión de 3,464 kV entre fases se reemplaza este valor en el transformador de la IEEE manteniendo sus parámetros originales.

Se realiza un flujo de potencia en DigSILENT de la red IEEE para su configuración inicial donde el consumo asociado al transformador en estudio (nodo 890) es de 450 kW y 220 kVar con lo que da una tensión de 0,89 pu. Sin embargo, si se va a incluir una red de Microformers en dicha barra (890) se debe disminuir el consumo que está por defecto en ella por dos razones: La primera es que si se disminuye la tensión en el secundario del transformador de la IEEE la tensión caería aún más en la barra 890; y como se analizó en 4.5.7 los Microformers necesitan al menos una tensión de 0,91 en alta para zonas urbanas.

Se agregan a la red de la IEEE la red del caso 2.3 conectado a la barra 888 que es la que está inmediatamente después del transformador de la IEEE y la red del caso 3.1 a la barra 890 que es donde se encuentra el consumo de la IEEE. Dicho consumo se disminuye a 150 kW y 110 kVar para que la tensión en su barra respectiva esté dentro de límites aceptables.

La figura 4.15 muestra el flujo de potencia de una parte de la red IEEE centrándose en el transformador de 24,9/3,464 kV junto a los nodos aledaños donde se conectan las microrredes de Microformers, lo que suman un total de 21 Microformers instalados.

El efecto de los Microformers en el sistema obviamente es marginal dado las potencias que se manejan (tabla 4.54). Localmente, los Microformers se comportan dentro de la norma (sobre todo los que están inmediatamente al transformador de la barra 888. En cambio, el sistema que está conectado a la barra 890 debe inyectar cantidades grandes de reactivos mediante las fuentes de generación para poder llegar a los 220 V en sus barras respectivas. Las demás barras que no poseen fuentes de generación cumplen con lo descrito en la sección anterior en lo referente a que el lado de baja del Microformer está por sobre dos puntos porcentuales en comparación con el lado de alta (ver figura 4.16).

Tabla 4.54: Variación de potencia en el nodo 888

Fase	Red sin Microformers		Red con Microformers	
	P [kW]	Q [kVar]	P [kW]	Q [kVar]
a	45,52	34,78	47,24	32,22
b	46,10	34,44	48,26	31,78
c	46,83	34,90	49,10	32,83
Total	138,45	104,12	144,60	96,83

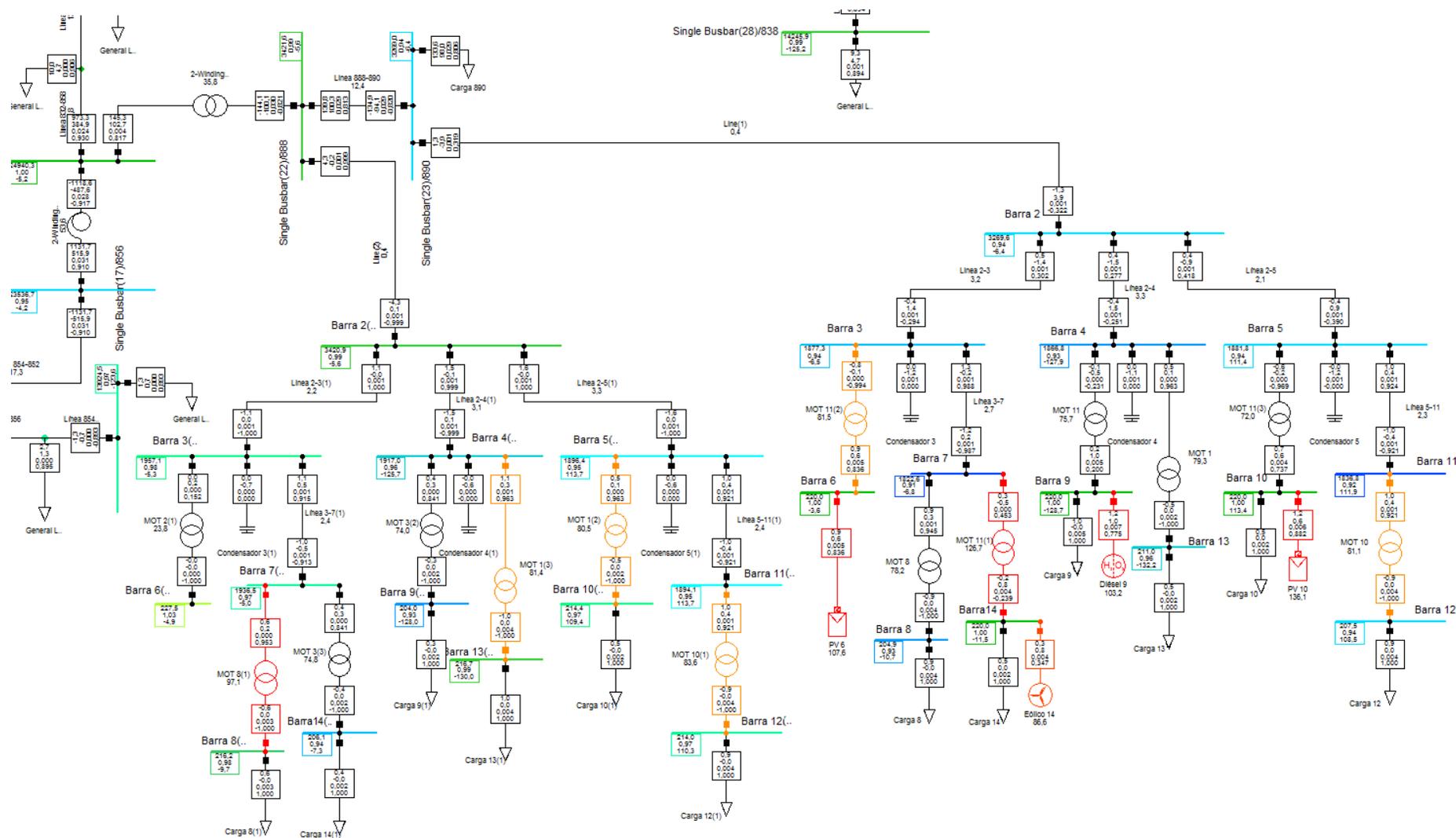


Figura 4.15: Red 2.3 y 3.1 en la red modelo IEEE 34 nodos

Capítulo 5

Conclusiones

Los Microformers son transformadores que tienen características eléctricas distintas en comparación con los transformadores industriales, debido a que los transformadores de microondas son diseñados para operar intermitentemente y no en un estado continuo. Por lo mismo, los parámetros eléctricos del Microformer presentan resultados desfavorables ya que no es posible despreciar la rama shunt del modelo del transformador como se hace con los del tipo industrial, donde la admitancia de excitación representa tan sólo el 0,1% de la impedancia serie en contraste con el Microformer donde su admitancia es más del doble que su impedancia serie, esto conlleva a una pérdida considerable en la eficiencia del Microformer. Por otra parte, mientras la resistencia de los enrollados en transformadores industriales corresponde generalmente entre el 10% al 20% de la reactancia de fuga, en los Microformers es cerca del 60%. Por último, La reactancia de fuga en los transformadores menores a 15 kV es menos que el 4% a diferencia del Microformer que representa más de dos veces este valor.

En base a lo anterior, el Microformer tiene aplicaciones limitadas y su implementación se justifica principalmente en casos donde haya consumos lejanos a fuentes de generación, a puntos de conexión o con limitaciones presupuestarias.

Para la construcción de Microformers es necesario considerar una disminución de la potencia nominal de los MOT's debido al calentamiento del núcleo, este queda fijado para una corriente nominal de 3 A donde el aumento de temperatura en sus enrollados queda dentro de los límites de la norma.

No todos los transformadores de microondas son útiles para ser convertidos en Microformers. Los que presentan núcleos más pequeños tienen mayor probabilidad de ser transformadores con altas corrientes de magnetización, sin embargo, no se recomienda descartarlos sin antes realizarles las pruebas de razón de transformación y de cortocircuito. Si en dichas pruebas la razón de transformación es baja ($< 9,8$) junto una alta corriente de magnetización ($> 2,5 A$) el transformador debe ser descartado.

Otro filtro viene dado por la cantidad de vueltas que tengan los enrollados, mientras menos número de vueltas la densidad de flujo magnético aumenta lo que deriva en un aumento en las pérdidas en el núcleo. Por lo tanto, si un transformador tiene menos de 220 vueltas calculadas junto a una ventana pequeña (dejada por las barras magnéticas) deber ser descartado o se debe disminuir aún más su potencia nominal, de lo contrario puede calentarse el núcleo de transformador llegando a temperaturas fuera de la norma, como es el caso del MOT 3.

La modificación de los transformadores de microondas debe realizarse según la aplicación deseada, se recomienda que:

- Para Microformers de subida se añadan espiras al enrollado de baja tensión con tal que se tenga una razón de transformación entre 9,1 a 9,2, para obtener así una tensión bajo carga cercana a 2 kV.
- Para Microformers con fuentes de generación local con regulación de tensión, se recomienda que la razón de transformación sea un poco más baja para evitar que el consumo o inyección de reactivos sea elevado. Razones de transformación entre 8,8 a 9,0 pueden aminorar este efecto.
- Para los Microformers de bajada donde existan sólo consumos, es recomendable aprovechar todo el espacio dejado por las barras magnéticas para lograr razones de transformación menores a 8,6.

En cuanto a la regulación de tensión, se puede lograr un mejor efecto, aparte de lo remendado anteriormente con los Microformers de bajada, al incluir Microformers alimentadores en paralelo y aún más cuando se consideran condensadores. En cuanto a estos últimos se recomienda su uso en distintos escenarios:

- Como regla general, se debe contar los Microformers por fase y considerar que en promedio los Microformers de bajada consumen 220 *Var* y los de subida deben ser compensados con alrededor de 300 *Var* por Microformer.
- Considerar que los condensadores que vienen en los microondas son de 1,05 μF lo que equivale a 1300 *Var* a 2 kV. Luego, mediante distintas combinaciones serie - paralelo de los condensadores se puede suplir los reactivos requeridos por fase.
- Si en alguna fase se encuentra un Microformer en solitario, difícilmente se tenga 3 condensadores de alta para conectarse en serie. En tal caso, es recomendable instalar un condensador en el lado de baja con tal que inyecte potencia reactiva para compensar el consumo de reactivos del Microformer de bajada. Éste condensador debe tener una capacidad entre 20 μF y 30 μF .

En relación al largo máximo y mínimo que pueda tener una línea esta varía dependiendo de la cantidad de carga a la que esté sometida, del tipo de conductor que esté hecha y de la razón de transformación de los Microformers que se tengan disponibles. Teniendo en cuenta esto se realizan las siguientes recomendaciones:

- Priorizar los Microformers con menor razón de transformación a los consumos que se encuentren más alejados de las fuentes generadoras.
- Los largos máximos para cargas cercanas al valor nominal son mostrados en la tabla 4.49 para cables de 14, 18 y 22 AWG en cobre, aluminio y acero. Por cada Microformer conectado en una misma fase la distancia calculada se reduce proporcionalmente.
- Los largos mínimos que justifican el uso del Microformer son mostrados en la tabla 4.50 para los mismos tipos de conductor.

Para una comunidad rural que se encuentre relativamente cerca (<15 km) de la red eléctrica puede ser provechoso conectarse a ella mediante un transformador industrial que baje la tensión a 3,646 kV entre fases, siempre y cuando la cantidad de casas o consumos lo amerite.

En cuanto al nivel de armónicos se recomienda tener en todo momento cargas que permitan tener los transformadores trabajando como mínimo a mitad de su potencia

nominal para que no se acentúen las distorsiones armónicas, sobre todo en sistemas aislados de la red eléctrica.

Como trabajo futuro se plantea realizar un estudio estadístico con un espacio muestral considerable de los transformadores de microondas para determinar qué tanto varían sus parámetros entre distintos modelos y marcas, con el fin de poder definir la validez de construir transformadores trifásicos en paralelo. También se propone investigar la existencia y costos de transformadores industriales que bajen la tensión a 3,464 kV entre fases. Realizar además un estudio de la cantidad de consumos que son necesarios para justificar su instalación.

También se propone disminuir los armónicos producto de la compensación por condensadores mediante filtros armónicos u otro método para que el Microformer se sitúe dentro de la norma internacional. Estudiar qué tanto disminuyen los armónicos al incluir un enrollado terciario en delta en los Microformers alimentadores.

La red experimental quedará disponible en el laboratorio de máquinas para usos pedagógicos, por lo mismo se propone realizar una guía de laboratorio que contenga algunos casos de estudio aquí analizados.

Bibliografía

- [1] D. Ludois, J. Lee, P. Mendoza y G. Venkataramanan, «Reuse of Post-Consumer E-Waste for Low Cost Micropower Distribution,» *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, pp. 137-142, Oct. 30 2011-Nov. 1 2011.
- [2] W. Brokering, R. Palma y L.Vargas, Ñom Lűfke (El Rayo Domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia, 1 ed., Santiago: Prentice Hall - Pearson Educación, 2008.
- [3] P. Avelino, Transformadores de distribución, México: Reverté, S.A., 2001.
- [4] U. d. C. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Ed., "Transformadores", Santiago: Oficina de Publicaciones Docentes, 1996.
- [5] Y. D. Valle, J. Romo y L. Vargas, «Conversión Electromecánica de la Energía,» *Apuntes EL42C*, 2003.
- [6] D. Ludois, P. Mendoza y J. Lee, «The Microformer, Low Cost Electrification in Developing Nations using Post-Consumer Resources,» 2011.
- [7] M. Gatica, «Certificación y Modelación del Transformador de Poder Microformer,» Universidad de Chile, Santiago, 2013.
- [8] The Microformer, «Make your Microformer,» [En línea]. Available: www.microformer.org/make-your-microformer/. [Último acceso: 02 Sept 2015].
- [9] R. Vilcahuamán, «Análisis Interactivo Gráfico de Sistemas Eléctricos de Distribución Primaria,» Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 1993.
- [10] A. Pansini, *Electrical Distribution Engineering*, Tercera ed., EE.UU.: The Fairmont Press, Inc., 2006.
- [11] A. Pansini, *Power Transmission and Distribution*, Segunda ed., EE.UU.: The Fairmont Press, Inc., 2005.
- [12] Comisión Nacional de Energía, «Decreto Supremo N°327,» *Diario Oficial*, 10 sept 1998.
- [13] IEEE Power and Energy Society, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 2014.
- [14] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, «NSEG 16.e.n.78. Electricidad. Epecificaciones de Transformadores de Distribución 13,2kv».
- [15] DigSILENT PowerFactory, User Manual, Gomaringen: DigSILENT GmbH, 2014.
- [16] DigSILENT PowerFactory, Technical Reference Documentation, Gomaringen: DigSILENT GmbH, 2011.

- [17] Distribution System Analysis Subcommittee, «Radial Distribution Test Feeders,» *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 908-912, 2001.
- [18] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, «Distribution Test Feeders,» IEEE, 2013. [En línea]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>. [Último acceso: septiembre 2015].

Anexo A: Modelo de red IEEE de 34 nodos

Datos básicos

Los siguientes datos son comunes para todos los sistemas independientemente del número de barras que posean:

Modelos de cargas

Las cargas pueden ser conectadas en un nodo o para ser uniformemente distribuidas a lo largo de una sección de línea. Las cargas pueden ser trifásicas (equilibradas o desequilibradas) o monofásicas. Las cargas trifásicas pueden ser conectadas en estrella o delta mientras que las monofásicas pueden ser conectadas línea a tierra o línea a línea. Todas las cargas pueden ser modeladas como kW y $kVAr$ constantes (PQ), impedancia constante (Z) o corriente constante (I).

Capacitores en derivación

Los bancos de capacitores trifásicos pueden ser conectados en estrella o delta y los capacitores monofásicos conectados línea a tierra o línea a línea. Los capacitores son modelados como una susceptancia constante y especificadas en los datos de placa nominal en $kVAr$.

Modelos de líneas aéreas

Los números de identificación de espaciamiento (spacing ID) y el tipo de línea aéreas son resumidas en la tabla A.1.

Tabla A.1: Espaciamiento de líneas aéreas

Spacing ID	Tipo
500	Trifásico, 4 cables
505	Bifásico, 3 cables
510	Monofásico, 2 cables

La figura A.1 muestra las distancia entre los conductores de fase y el conductor neutro para los números de identificación usados en las líneas aéreas.

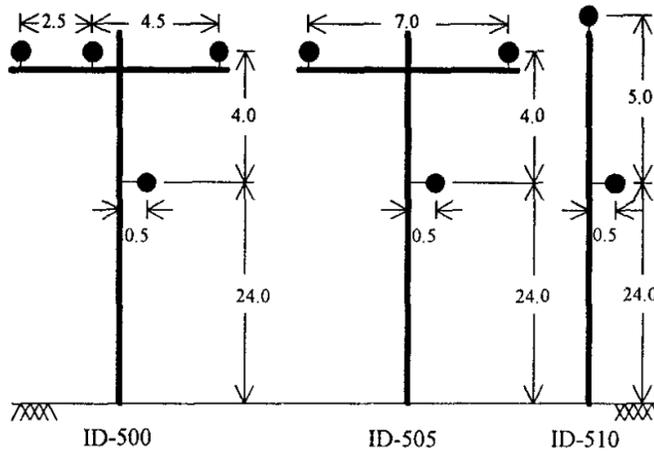


Figura A.1: Espaciamiento de líneas aéreas [17]

El modelo de red posee las siguientes características:

- 1) Cada sección del sistema de distribución es modelado por valores de impedancia de fase reales.
- 2) El sistema incluye líneas monofásicas y bifásicas laterales.
- 3) Las cargas en cada fase de cada sección son especificadas en potencia activa y reactiva.
- 4) El sistema incluye reguladores de tensión y compensadores capacitivos de potencia reactiva.
- 5) El sistema tiene líneas de distribución largas y ligeramente cargadas.
- 6) Hay un transformador que reduce la tensión a 4.16 kV para una sección corta del alimentador.

La figura A.2 muestra la red de prueba de la IEE de 34 nodos, las configuraciones y el detalle de los parámetros son mostrados a continuación.

Tabla A.2: Datos de Transformadores

	kVA	kV-alta	kV-baja	R - %	X - %
Subestación (nodo 800)	2500	69 - D	24,9 - Yn	1	8
XFM -1	500	24,9 - Yn	4,16 - Yn	1,9	4,08

Los datos de los transformadores son mostrados en la tabla 2.7 donde el transformador principal está ubicado en el nodo 800. Se especifican las potencias nominales, el tipo de conexión entre los enrollados y la impedancia serie en base propia.

La tabla A.3 muestra la configuración de las líneas aéreas donde se muestran las fases el calibre de los cables asociados y el espaciamiento de las fases que fue especificado en la figura A.1 En base a esto, la tabla A.4 muestra los largos de las líneas entre nodos junto a su configuración.

Tabla A. 3: Configuración de líneas aéreas

Config.	Fases	Calibre de la fase	Calibre del Neutro	Spacing ID
		ACSR	ACSR	
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

Tabla A.4: Datos de las líneas

Nodo A	Nodo B	Largo [m]	Config.
800	802	786,4	300
802	806	527,3	300
806	808	9823,7	300
808	810	1769,1	303
808	812	11430,0	300
812	814	9061,7	300
814	850	3,0	301
816	818	521,2	302
816	824	3112,0	301
818	820	14676,1	302
820	822	4188,0	302
824	826	923,5	303
824	828	256,0	301
828	830	6230,1	301
830	854	158,5	301
832	858	1493,5	301
832	888	0,0	XFM-1
834	860	615,7	301
834	842	85,3	301
836	840	262,1	301
836	862	85,3	301
842	844	411,5	301
844	846	1109,5	301
846	848	161,5	301
850	816	94,5	301
852	832	3,0	301
854	856	7111,0	303
854	852	11225,8	301
858	864	493,8	302
858	834	1777,0	301
860	836	816,9	301
862	838	1481,3	304
888	890	3218,7	300

Los consumos de potencia activa y reactiva son especificados en las tablas A.5 y A.6, la primera muestra las cargas puntuales mientras que la segunda muestra las cargas distribuidas. En ambas, las cargas son modeladas como potencia (PQ), impedancia (Z) o corriente constante (I).

Tabla A.5: Cargas puntuales

Nodo	Carga	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
	Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

Tabla A.6: Cargas Distribuidas

Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
A	B	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

Tabla A. 7: Datos de los reguladores

Regulador	1			2		
Segmento de línea	814 - 850			852 - 832		
Localización	814			852		
Fases	A - B -C			A - B -C		
Conexión	3-Ph,LG			3-Ph,LG		
Secuencia	A-B-C			A-B-C		
Ancho de banda	2.0 volts			2.0 volts		
PT Ratio:	120			120		
Primary CT Rating:	100			100		
Parámetros del compensador	Ph-A	Ph-B	Ph-C	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R [pu]	2,7	2,7	2,7	2,5	2,5	2,5
X [pu]	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
Nivel de tensión	122	122	122	124	124	124