



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERIA

Química Del Valle: Sistema Paralelo de Generación Eléctrica

**Proyecto integrador profesional presentado por Nicolás
Jeremias Del Valle para obtener el grado de Ingeniero
Eléctrico.**

Director: Ing. Rubén Pérez.

Co-Director: Ing. Silvano Pacher

2022

Departamento de Electrotecnia

“Sistema Paralelo de Generación Eléctrica”

Para la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

Fecha de Presentación: 01/06/2022

AUTOR:

Del Valle Nicolás Jeremías

DIRIGIDA POR:

Director Ing. Pérez Rubén

Co-Director Ing. Pacher Silvano

JURADO:

Resumen.

El presente trabajo, centra su atención en el diseño y cálculo de un sistema paralelo de generación eléctrica, es decir, generación de energía desde una o más fuentes internas de la Planta, para, en conjunto con la red externa, abastecer a la misma.

Se presentan cuatro alternativas para la generación externa: generar un 25%, 50%, 75% o 100%.

El enfoque principal se concentrará en un transformador de tres devanados: dos de entrada y uno de salida. A través de este se podrá abastecer a la planta desde la red externa, de la fuente de generación o una combinación de ambos. Se mencionará en el siguiente proyecto, de manera descriptiva, distintos tipos de generación eléctrica que podrían aplicarse en la planta: Generación Solar, Generación a gas/diesel y Generación a través de Hidrógeno.

En el primer capítulo, se presentan conceptos relacionados al proceso productivo de la Planta. La misma está destinada a la producción de hipoclorito de sodio, a través del proceso de electrolisis. Luego se menciona el funcionamiento y las principales características del transformador-rectificador que alimenta las celdas electrolíticas.

En el segundo capítulo, se realiza un análisis de la demanda de la Planta, teniendo en cuenta los consumos del año 2020, entregados por el Ing. Pacher Silvano. Con estos datos, se procede al diseño y cálculo del transformador de tres devanados. Después, se realizan los cálculos eléctricos pertinentes a la instalación, es decir, cálculos de sección de conductores, protecciones y barras basados en la norma AEA 90364.

En el tercer capítulo se indagará de lleno en lo que respecta al transformador de tres devanados. Se analizará su principio de funcionamiento, características de diseño y protecciones.

En el cuarto capítulo, se mencionan de manera descriptiva distintos tipos de generación que podrían ser aplicados en la planta: generación solar, generación a través de combustible (gas y diesel) y generación a través de hidrógeno. Se realiza también, un cálculo estimativo de paneles solares y demás componentes para la generación solar.

En el quinto capítulo, se realiza el análisis económico del proyecto. Para esto se utilizan instrumentos como VAR y TIR, y a través de los resultados se sacan conclusiones con respecto a la rentabilidad o no del proyecto.

Finalmente, se describen los resultados obtenidos a partir del análisis de los cálculos realizados, y se resalta el beneficio que generaría colocar un transformador de tres devanados en la Planta para poder abastecer a la misma desde otra fuente.

Abstract.

The present work focuses its attention on the design and calculation of a parallel electricity generation system, that is, the generation of energy from one or more internal sources of the Plant, in order, together with the external network, to supply it.

There are four alternatives for external generation: generate 25%, 50%, 75% or 100%.

The main focus will be on a three-winding transformer: two input and one output. Through this, the plant can be supplied from the external network, the generation source or a combination of both. It will be mentioned in the following project, in a descriptive way, different types of electricity generation that could be applied in the plant: Solar Generation, Gas / Diesel Generation and Hydrogen Generation.

In the first part, concepts related to the production process of the Plant are presented. It is intended for the production of sodium hypochlorite, through the electrolysis process. Then the operation and the main characteristics of the transformer-rectifier that feeds the electrolytic cells is mentioned.

In the second part, an analysis of the demand of the Plant is carried out, taking into account the consumption of the year 2020, delivered by Ing. Pacher Silvano. With these data, we proceed to the design and calculation of the three-winding transformer. Then, the electrical calculations pertinent to the installation are carried out, that is, calculations of the section of conductors, protections, etc. based on AEA 90364 standard.

In the third part, different types of generation that could be applied in the plant are descriptively mentioned: solar generation, generation through fuel (gas and diesel) and generation through hydrogen. An estimate of solar panels and other components for solar generation is also carried out.

In the fifth chapter, the economic analysis of the project is carried out. For this, instruments such as VAR and TIR are used, and through the results conclusions are drawn regarding the profitability or not of the project.

Finally, the results obtained from the analysis of the calculations made are described, and the benefit that would be generated by placing a three-winding transformer in the Plant in order to supply it from another source is highlighted.

Agradecimientos.

A mi familia, fuente de apoyo y sostén incondicional en toda mi vida y más aún en los años de la carrera universitaria.

A mis padres, ejemplos de que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A Nicolás Parra, compañero incondicional durante toda la carrera

A mis compañeros y amigos de la facultad, con quienes hemos recorrido juntos este camino.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería, por su apoyo durante el cursado de la carrera.

Al Ing. Rubén Pérez, profesor y director de esta Tesis, por su apoyo proporcionado durante la carrera y el desarrollo del proyecto final integrador.

A Química Del Valle SRL, que a través del Ingeniero Silvano Pacher, socio de la misma, me permitió realizar la Tesis en su Planta, proporcionando información y parte de su tiempo para avanzar con el proyecto.

Contenido

Resumen.	3
Abstract.	4
Agradecimientos.	5
Contenido	6
Introducción.....	9
Capítulo 1.	10
1.1 Descripción de la planta.....	10
1.2 Celdas electrolíticas.	11
1.2.1 Proceso de electrolisis.....	12
1.3 Transformador-Rectificador.	14
1.4 Diagrama Unifilar de la Planta	16
Capítulo 2.	17
2.1 Análisis de la demanda.	17
2.2 Criterios de selección del Transformador	20
2.3 Conductores	23
2.4 Puesta a Tierra	26
2.4.1 Esquema de conexión TT	26
2.5 Protecciones.....	27
Capítulo 3	31
3.1 Diagramas de secuencia cero para transformadores de tresdevanados.....	31
3.2 Impedancias	33
Capítulo 4	36
4.1 Sistemas de Generación.....	38
4.2 Generación en Paralelo	46
Capítulo 5	47
5.1 Estudio de Costos	47
5.2 Variables Económicas	48
5.3 Evaluación del proyecto	50
Capítulo 6	53
6.1 Conclusiones.....	53
Anexos.	54
Bibliografía.	55

Índice de figuras.

Figura 1 Planta Química Del Valle SRL	10
Figura 2 Celda electrolítica	12
Figura 3 Proceso de generación de cloro	13
Figura 4 Transformador- Rectificador	14
Figura 5 Diodos Utilizados en el transformador-rectificador	15
Figura 6 Tiristor utilizado en el transformador-rectificador	16
Figura 7 Consumo de energía anual en Punta	18
Figura 8 Consumo de energía anual en Valle	18
Figura 9 Consumo de energía anual en Resto	19
Figura 10 Consumo de energía anual Total	19
Figura 11 Ejemplo de conexión de transformador de tres devanados con arreglo delta-estrella-estrella	21
Figura 12 Ejemplo de conexión de transformador de tres devanados con arreglo delta-delta-estrella	22
Figura 13 Ejemplo de conexión de transformador de tres devanados con arreglo estrella-delta-delta	22
Figura 14 Propuesta de diseño de transformador de tres devanados	23
Figura 15 Corrientes admisibles de conductores	24
Figura 16 Esquema de conexión a tierra TT	27
Figura 17 Esquema de protección de Relé Inverso	28
Figura 18 Circuito equivalente de las conexiones más comunes y prácticas para transformadores de tres devanados.	31
Figura 19 Arreglo de conexión de los devanados y su diagrama de secuencia cero equivalente.	32
Figura 20 Circuito equivalente de un transformador de tres devanados	34
Figura 21 Generador de MT a Gas	39
Figura 22 Generador de MT a Diesel	39
Figura 23 Irradiancia en Argentina	39
Figura 24 Características de los paneles solares	44
Figura 25 Características de los inversores	45
Figura 26 Esquema de circuito de un transformador de n circuitos	51
Figura 27 Circuitos equivalentes para transformadores de tres circuitos. El circuito equivalente exacto a), se reduce a los aproximados b) y c), al despreciar la corriente de excitación	53
Figura 28 Esquema de transformador de tres circuitos a), y pasos sucesivos en la deducción de los circuitos equivalentes aproximados d) y e).	55
Figura 29 Ensayo en cortocircuito para medir las impedancias equivalentes, a) esquema de circuito y b) circuito equivalente correspondiente	55

Índice de Tablas.

Tabla 1	Tabla de consumo de energía eléctrica anual	17
Tabla 2	Tabla resumen de potencias y corrientes según tramo horario	20
Tabla 3	Tabla resumen Datos del Transformador	23
Tabla 4	Tabla verificación caída de tensión	25
Tabla 5	Tabla verificación del conductor contra cortocircuitos	26
Tabla 6	Tabla Resumen -Datos del Conductor	26
Tabla 7	Tabla Resumen de Potencia y Corrientes	41
Tabla 8	Tabla Resumen Resultados Parciales	45
Tabla 9	Tabla Resumen Resultados Finales	46
Tabla 10	Tabla Costos de Materiales del Sistema de Conexión	47
Tabla 11	Tabla Costos de Mano de obra del Sistema de Conexión	47
Tabla 12	Tabla Costos de Materiales del Sistema de Generación Solar	48
Tabla 13	Tabla Costos de Mano de obra del Sistema de Generación Solar	48
Tabla 14	Tabla Costos del Sistema de Generación Diesel	48
Tabla 15	Tabla Costos de Mano de Obra Sistema de Generación Diesel	48
Tabla 16	Tabla Ahorro energético	48
Tabla 17	Tabla Análisis del VAN	50
Tabla 18	Flujo de Cajas- Sistema de Conexión	50
Tabla 19	Análisis de Sensibilidad según horas de generación	51
Tabla 20	Flujo de Cajas-Sistema de Conexión y Generación Solar	53

Introducción.

El objeto de este proyecto es tratar la problemática que se presenta al incorporar un sistema paralelo de generación eléctrica a la planta, para abastecer a las celdas electrolíticas en la empresa Química Del Valle de la ciudad de Cinco Saltos, Provincia de Río Negro.

Para lograr la incorporación del sistema paralelo de generación, se propone un transformador de tres devanados: dos de entrada y uno de salida.

En los devanados de entrada se conectarán la red externa, y un sistema de generación que puede ser solar, a través de combustibles, hidrógeno u otros.

El devanado de salida alimentará un transformador-rectificador que alimenta las celdas electrolíticas de la planta.

Se comenzó investigando las características de entrada (tensión, sistema de conexión) del transformador-rectificador de la Planta.

Luego, se realizó un análisis de la demanda de energía a través de los consumos obtenidos de las facturas correspondientes al período Enero 2020- Enero 2021.

Con los datos mencionados anteriormente, se efectúa el diseño y cálculo preliminar del transformador de tres devanados. A su vez, se detalla el funcionamiento del transformador y sus características constructivas.

Una vez realizado el diseño y cálculo del transformador, se procede a diseñar la instalación eléctrica pertinente a la interconexión del mismo. Esto es, cálculo y diseño de: conductores, canalizaciones, protecciones y barras.

Se mencionó de forma descriptiva los distintos tipos de generación, y se realizó un cálculo estimado de los mismos.

Luego se realiza una breve explicación del funcionamiento del sistema de generación en paralelo.

Capítulo 1.

1.1 Descripción de la planta.

Química del Valle SRL es una empresa pyme regional, ubicada en el Parque Industrial de la Ciudad de Cinco Saltos, Provincia de Río Negro, destinada a la producción de hipoclorito de sodio. Mediante celdas de membrana, se realiza un proceso de electrolisis por el cual se produce gas cloro, hidróxido de sodio e hidrógeno. Con estos productos se elabora el hipoclorito de sodio.

El hipoclorito de sodio es altamente utilizado para el tratamiento y desinfección de agua para consumo humano, y también en aplicaciones industriales. Frecuentemente se precisan utilizar importantes cantidades de cloro o hipoclorito como desinfectante, oxidante o como sistema de cloración.



Figura 1 Planta Química Del Valle SRL

1.2 Celdas electrolíticas.

Una celda electrolítica es un dispositivo electroquímico en el que se consume energía eléctrica para impulsar una reacción de óxido reducción o reacción redox no espontánea.

Muchas de las reacciones no espontáneas que se llevan a cabo en las celdas electrolíticas implican la ruptura de un compuesto químico en sus elementos constituyentes o en sustancias químicas más simples. A esta clase de procesos de lisis o ruptura impulsados por energía eléctrica se le denomina electrólisis, que es de donde reciben su nombre las celdas electrolíticas.

Las celdas electrolíticas permiten convertir energía eléctrica en energía potencial química. También forman la base de muchos procesos metalúrgicos sin los cuales la sociedad como la conocemos hoy no existiría.

Las celdas electrolíticas están compuestas por un recipiente donde se sumergen dos electrodos en una solución en la que se encuentran disueltos iones, y estos están conectados a una fuente de corriente continua.

Los electrodos son elementos metálicos que proporcionan la superficie de contacto entre la solución y el conductor eléctrico y en los que se producen las reacciones de oxidación y reducción. El cátodo es el electrodo donde se da lugar a la reacción de reducción, es decir, donde las especies químicas ganan electrones; este posee carga negativa, y por ende, a él migran los iones con carga positiva. Mientras que el ánodo es el que se produce la reacción de oxidación, este es el que posee entonces carga positiva y a él migran los iones con carga negativa. Cuando los electrodos no intervienen en dichas reacciones (es decir, ni se oxidan ni se reducen) estos son llamados electrodos inertes o pasivos, y cuando participan se les denomina electrodos activos.

Cuando se aplica el voltaje a los electrodos al cerrar el circuito, los iones disueltos en la solución son atraídos al electrodo con la carga opuesta a este. Cuando el voltaje aplicado es suficiente y con la polaridad correcta, entonces se puede producir la descomposición de un compuesto químico estable.

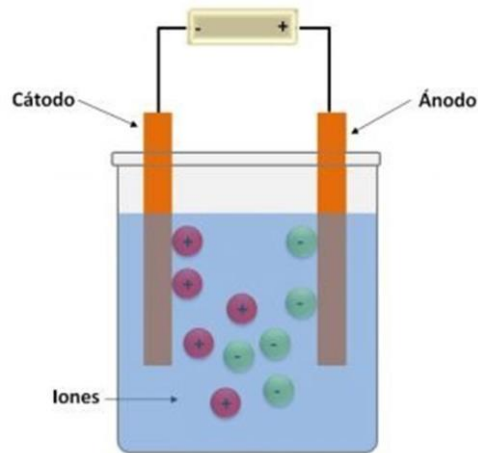


Figura 2 Celda electrolítica

1.2.1 Proceso de electrolisis.

El proceso de generación electrolítica de cloro se basa, en términos generales, en la electrolisis de una disolución de cloruro sódico o sal común en agua (salmuera).

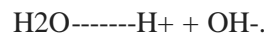
El corazón del generador es una célula de electrolisis que contiene dos electrodos: el ánodo con carga positiva y el cátodo con carga negativa. En esta célula se introduce una solución de cloruro sódico, que se obtiene simplemente disolviendo sal en agua.

Los iones que se hallan presentes son:

- Procedentes de la sal, el ión cloruro (Cl^-) y el ión sodio (Na^+):



- Procedentes del agua, el hidrogenión (H^+) y el ión hidroxilo (OH^-):



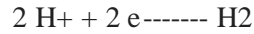
A continuación se hace pasar una corriente continua a través de los electrodos. En estas condiciones:

En el electrodo positivo (ánodo), los iones cloruro ceden un electrón y se transforman en cloro; en el agua queda el sodio (Na^+) restante:



Cloruro ---- cloro + electrón.

En el electrodo negativo (cátodo), el hidrogenión (H⁺) capta un electrón y se transforma en hidrógeno (H₂), en el agua quedan los iones hidroxilo (OH⁻) restantes:



Hidrogenión + electrón ---- hidrógeno

Los iones sodio (Na⁺) e hidroxilo (OH⁻) restantes se unen para formar hidróxido sódico (NaOH), que queda en solución junto con el resto de la salmuera no utilizada en el proceso de electrólisis.



ión sodio + ión hidroxilo ↔ hidróxido sódico

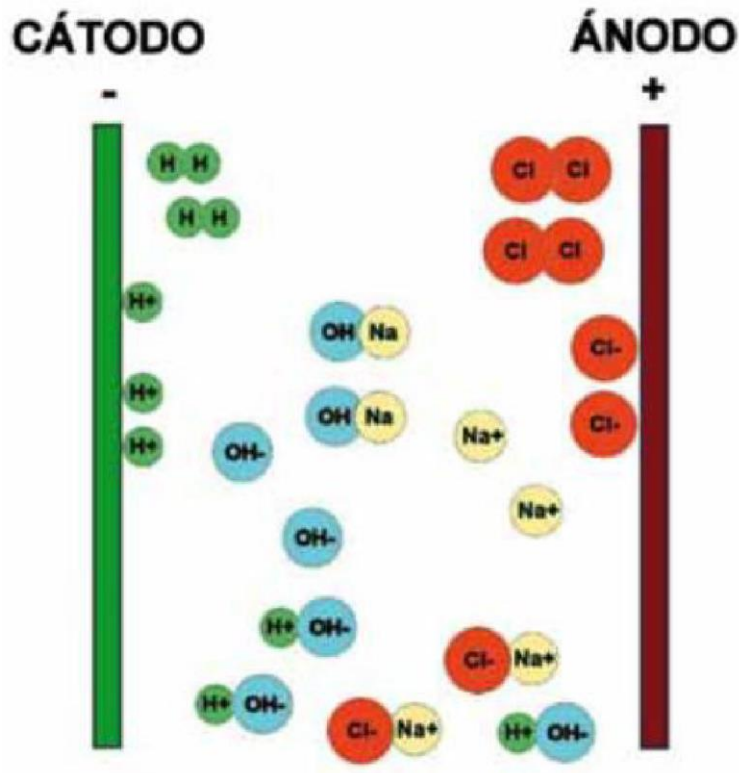


Figura 3 Proceso de generación de cloro

Para el proceso de electrólisis la planta utiliza la tecnología de membranas. La celda opera a densidades de corriente de 2.500-4.000 A/m².

1.3 Transformador-Rectificador.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, el proceso electrolítico de la planta requiere de un suministro de corriente continua de forma permanente. Para lograr esto, la planta cuenta con un transformador-rectificador que cumple dicha función.

El rectificador de corriente continua para procesos electrolíticos, es un equipoconvertidor alterna/continua, con alimentación trifásica primaria en 380V+N, y salidaen corriente en continua de 45/90 Vcc máximos a 2500 A. El equipo cuenta con trespartes principales: el rectificador de potencia principal (ERPP), el módulo de controlador digital remoto y el módulo de visualización analógica.

El equipo puede operar de dos modos; Modo Corriente, comportándose como una fuente de corriente constante con limitación de tensión dinámica ó Modo Tensión, haciéndolo como fuente de tensión constante con limitación de corriente dinámica, independientemente de la carga o variaciones en la alimentación primaria. El equipo, para el proceso de electrolisis de la planta está configurado en Modo Corriente.

El rectificador está formado por una unidad rectificadora de 2500 A sumada en barras de corriente continua. El rectificador de 2500 A está alimentado por un transformador principal que cuenta con seis secundarios, éstos alimentan a cinco rectificadores trifásicos de onda completa de 500 A cada uno.



Figura 4 Transformador- Rectificador



Figura 5 Diodos Utilizados en el transformador-rectificador

Para controlar la potencia de salida, el transformador es alimentado desde un módulo convertidor CA/CA tiristorizado, con control por fase.

El tiristor es un semiconductor de potencia que se utiliza como interruptor, ya sea para conducir o interrumpir la corriente eléctrica.

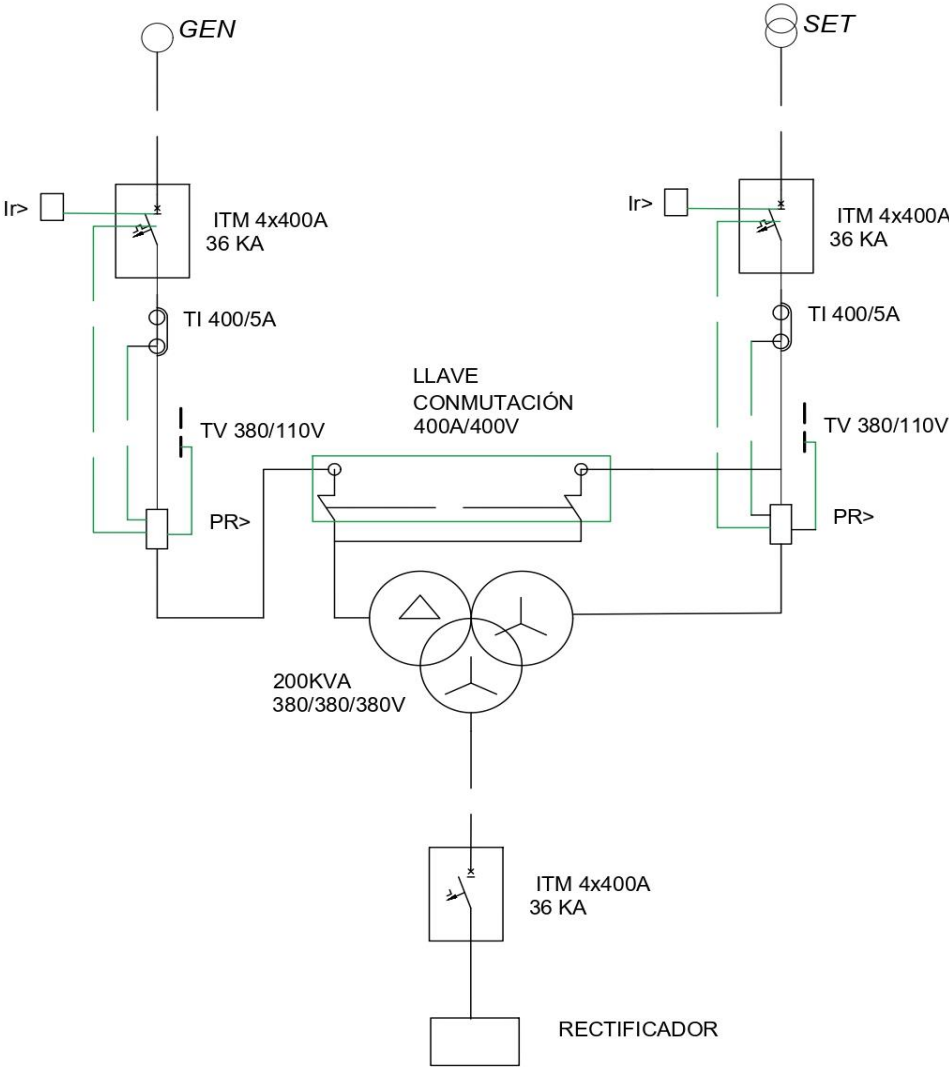
Están conformados por 3 terminales un ánodo, un cátodo y una compuerta o mejor conocida “gate”, su funcionamiento se asemeja al de un relevador o un interruptor mecánico, ya que cuando aplicas una corriente a la terminal gate, este se activa y obtiene la característica de dejar pasar a la electricidad. Controlando el ángulo de disparo del gate, es que se puede obtener a la salida un porcentaje de la potencia total.



en el transformador-rectificado

Figura 6 Tiristor utilizado

1.4 Diagrama Unifilar de la Planta



Capítulo 2.

2.1 Análisis de la demanda.

Con el objetivo principal de determinar la potencia que deberá suministrar el transformador de tres devanados, y además, luego determinar condiciones eléctricas que deben satisfacer todos los componentes del proyecto, se estimó como punto de partida la energía consumida durante el período correspondiente a Enero 2020-Enero 2021.

Para esto, se realiza un relevamiento de todas las facturas del período entregadas por el Ingeniero Silvano Pacher, permitiendo obtener el consumo de energía real de uno de los medidores de la Planta.

Además de lo expresado anteriormente, se ve reflejado en las siguientes tablas el promedio anual del consumo de energía.

En estas tablas, se discriminan dichos consumos según los escenarios de consumo diarios (Punta, Valle y Resto).

Los tramos horarios “en punta”, “valle” y “resto”, se definen de la siguiente forma: horas de punta, desde las 19 hasta las 01 horas, las horas de valle, desde las 01 a las 06 horas y las horas de resto desde las 6 hasta las 19 horas.

Consumo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Punta (kW/h)	19545	18825	20520	18255	17910	14925	12210	13830	13800	16755	19995	18780	17112,5
Valle (kW/h)	25110	23325	24720	22560	22350	18705	14670	17640	17580	20580	24735	23355	21277,5
Resto (kW/h)	50925	48315	52455	48075	47190	39675	32145	37170	37140	42975	51750	51855	44972,5
Total (kW/h)	95580	90465	97695	88890	87450	73305	59025	68640	68520	80310	96480	99990	83362,5

Tabla 1 Tabla de consumo de energía eléctrica anual

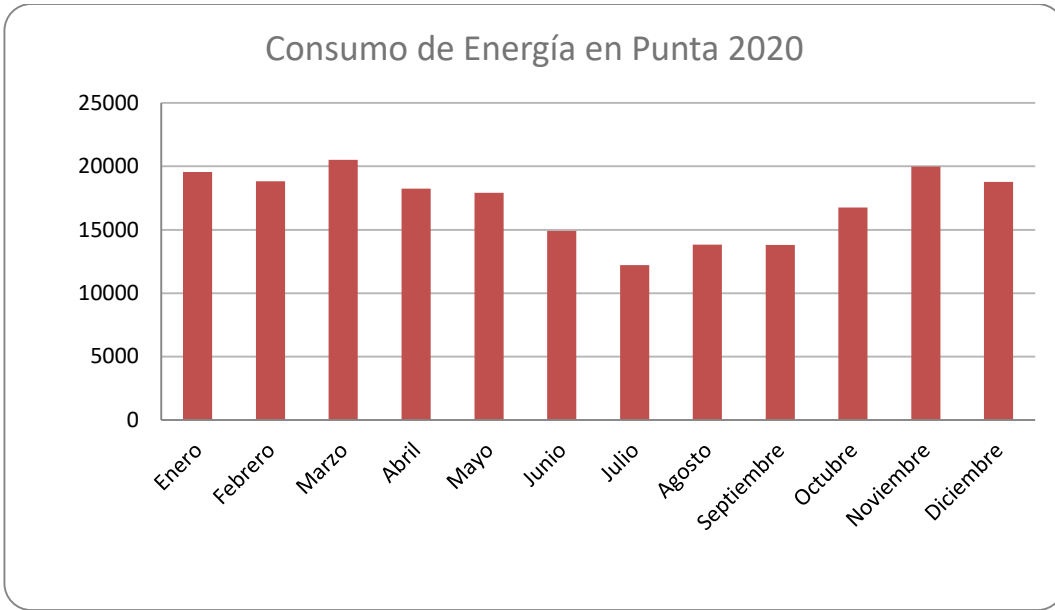


Figura 7 Consumo de energía anual en Punta

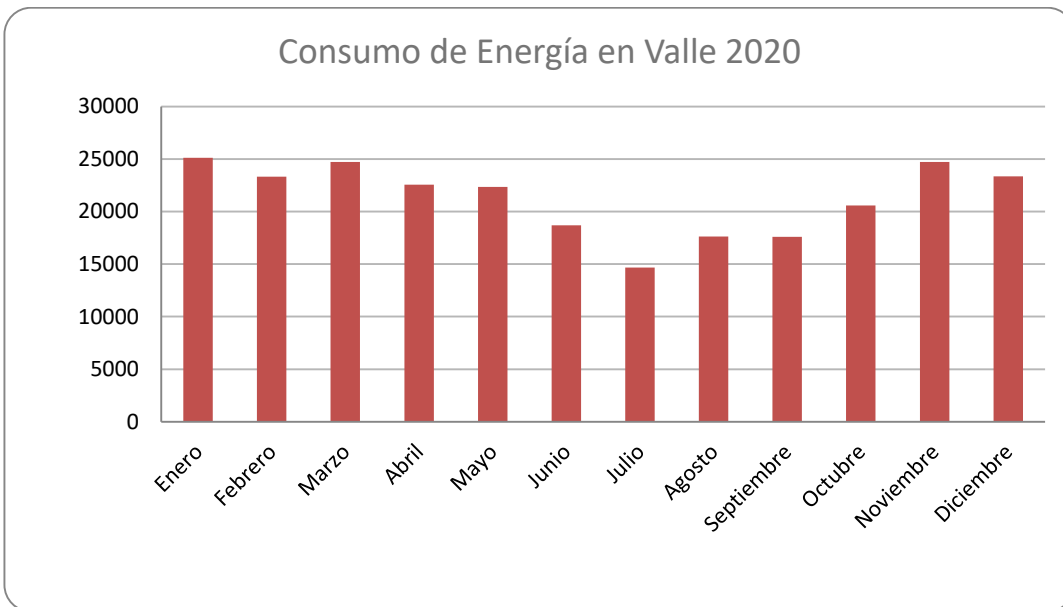


Figura 8 Consumo de energía anual en Valle

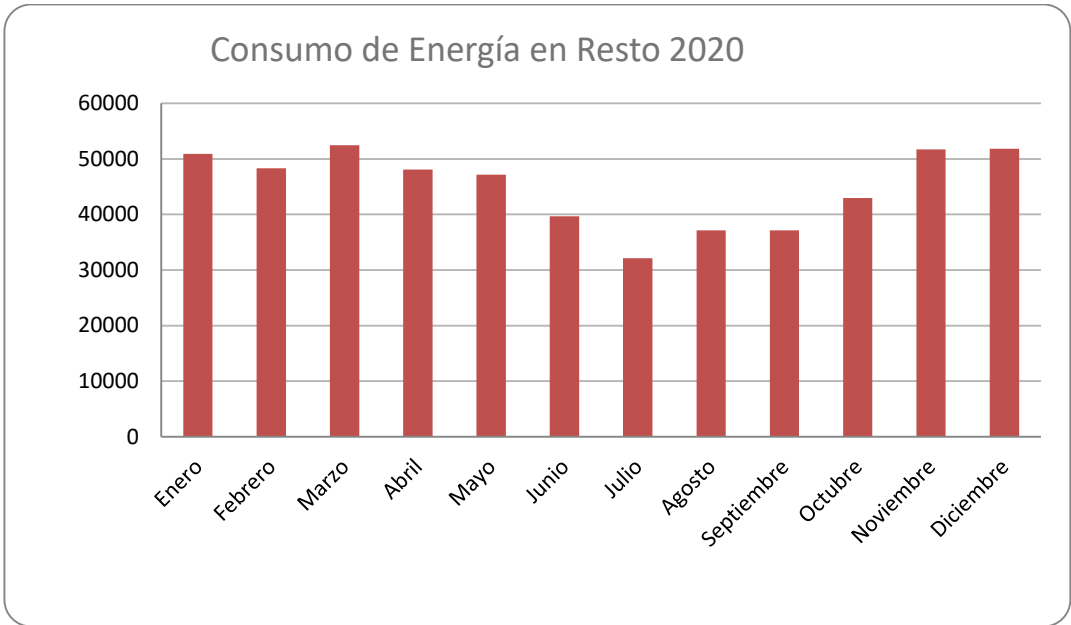


Figura 9 Consumo de energía anual en Resto

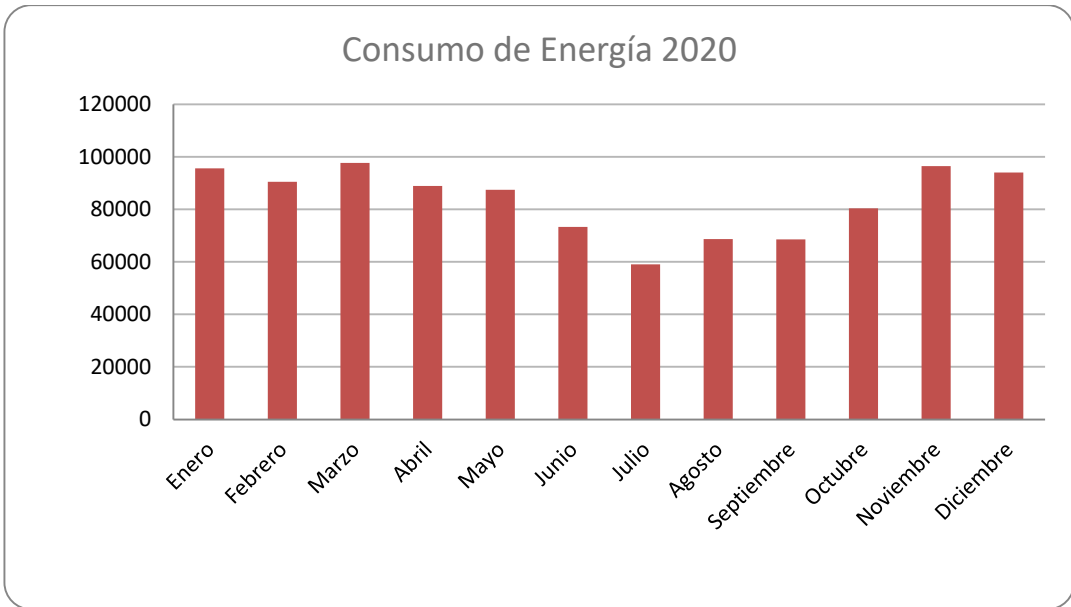


Figura 10 Consumo de energía anual Total

A continuación, se calculará la potencia absorbida en los distintos tramos horarios:

La potencia absorbida se obtiene de la siguiente manera:

$$Potencia\ absorbida = \frac{Energía\ promedio\ mensual}{horas\ de\ uso\ x\ 30\ días}$$

La corriente se obtiene de la siguiente manera:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times 380\ V \times \cos\ \theta}$$

Los cálculos se ven reflejados en la siguiente tabla:

	Consumo max.(kW.h)	Pot. Máx. Promedio (kW)	Pot.Reactiva (kVAr)	Pot.Aparente (kVA)	Corriente (A)
Punta	20520	114,00	96,02	149,050	226,73
Valle	25110	139,50	117,50	182,39	277,44
Resto	52455	145,71	122,73	190,51	289,79
Total	97695	135,69	114,29	177,41	269,86

Figura 2 Tabla resumen de potencias y corrientes según tramo horario

2.2 Criterios de selección del Transformador

Para poder abastecer la planta desde la red y el generador, se propone instalar un transformador de tres devanados. El mismo tendrá dos devanados primarios (entrada) y un devanado secundario (salida).

Los criterios para seleccionar un transformador están basados en la Norma IRAM 2250 (Transformadores de Distribución) y complementarias, y son los siguientes:

- Tipo de transformador: Se refiere al tipo de aislación y ubicación del mismo (exterior o intemperie).

Para la planta, se seleccionará un transformador aislado en aceite libre de PCB, debido a que son útiles para áreas con una atmósfera corrosivas.

- Cantidad de devanados: Tres devanados para este caso (dos de entrada, uno de salida).

- Potencia en kVA del transformador: Después de calcular la potencia necesaria para alimentar las celdas electrolíticas, se determina que la potencia nominal del transformador deberá ser de 200kVA, o la superior inmediata.
- Tensión nominal en los devanados: Se debe tener en cuenta las tensiones nominales de los tres devanados. En este caso, uno de los bobinados de entrada deberá tener el nivel de tensión proveniente de la red, en este caso 380V, y el otro bobinado de entrada deberá tener el nivel de tensión proveniente del equipo de generación. El nivel de tensión del bobinado de salida será de 380V, debido a que el transformador-rectificador a alimentar posee ese nivel de tensión.
- Método de conexión: La conexión de los devanados depende básicamente de su aplicación.
 - Delta-Estrella-Estrella: Este esquema es utilizado para integrar una unidad de generación en el devanado en conexión Delta. La carga se conecta en cada uno de los devanados en conexión en estrella. Se tiene la ventaja de que cada uno de los devanados puede estar conectado a un nivel de tensión diferente. Por ejemplo, generación en 18 kV, carga en 13.8 kV y sincronización a otro sistema o fuente de energía comercial en 34.5 kV. Sin embargo, existe una corriente de secuencia cero entre los dos devanados en conexión en estrella cuando el neutro se conecta a tierra.

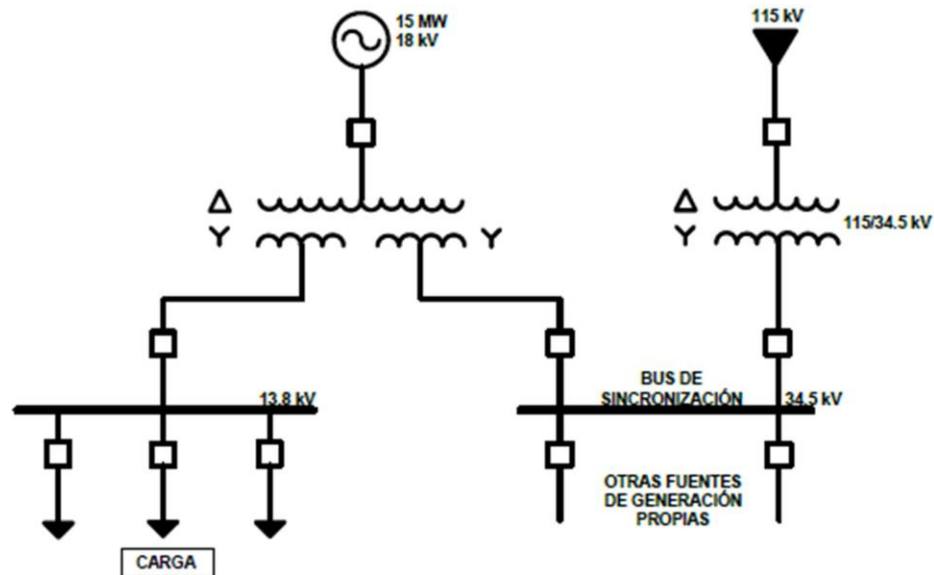


Figura 11 Ejemplo de conexión de transformador de tres devanados con arreglo delta-estrella-estrella

- Delta-delta-estrella. Este esquema es utilizado para integrar dos fuentes de energía e integradas a una carga. Tiene la ventaja de aislar las corrientes de secuencia cero entre los tres sistemas interconectados por los tres devanados.

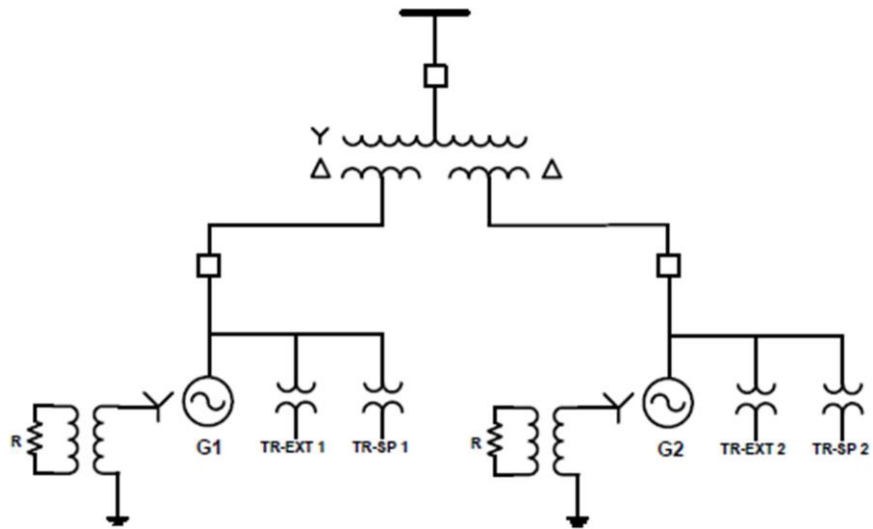


Figura 12 Ejemplo de conexión de transformador de tres devanados con arreglo delta-delta-estrella

- Estrella-delta-delta. Este esquema funciona de manera similar al arreglo delta-estrella-estrella, con la ventaja de que no se presenta corriente de secuencia cero entre los devanados en conexión delta, y entre los devanados en conexión estrella-delta.

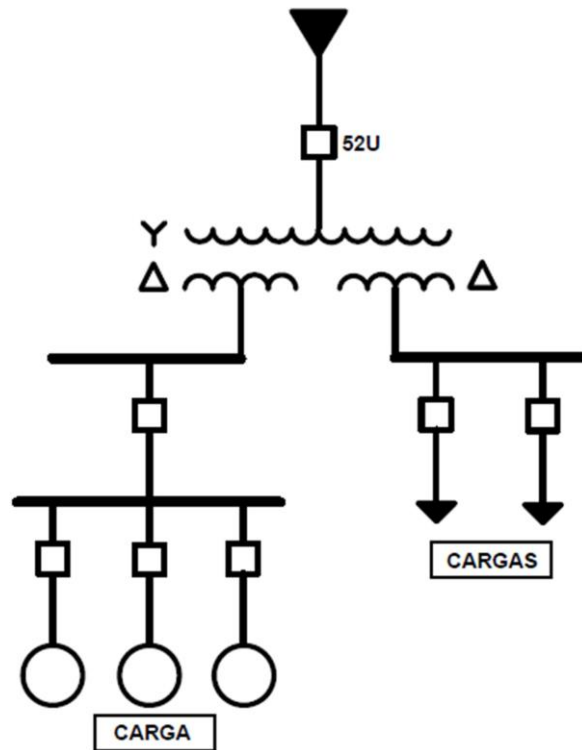


Figura 13 Ejemplo de conexión de transformador de tres devanados con arreglo estrella-delta-delta

La conexión del transformador será Delta-Estrella-Estrella, conectando el sistema de generación en Delta, la conexión de la red en Estrella y la carga en Estrella. Esto tiene la ventaja de no presentar corriente de secuencia cero entre el sistema de generación, y la red y carga.

El transformador a instalar de la planta no será del tipo convencional, es decir, deberá mandarse a fabricar según los requerimientos expresados anteriormente.

Tabla Resumen-Datos del Transformador		
Descripción	Unidad	Valor Especificado
Norma	-	IRAM 2250
Tipo de Transformador	-	Intemperie
Cantidad de Devanados	-	3
Metodo de Conexión	V	Dyy
Potencia en kVA	kVA	200
Tension Nominal en V	V	380/380/380 V
Corriente		
Primaria	A	304,28
Secundaria	A	304,28
Terciaria	A	304,28

Tabla 3 Tabla resumen de Datos del Transformador

Se propone que el mismo sea de un solo núcleo magnético en el que se incorporan todos los devanados necesarios. Se arrollan las espiras primarias y secundarias en cada una de las fases. Este tipo de transformadores se denomina de tres columnas. En estos, se considera cada columna como un transformador monofásico. Dependiendo de la relación de transformación entre los bobinados de entrada y salida, serán las vueltas de cada devanado.

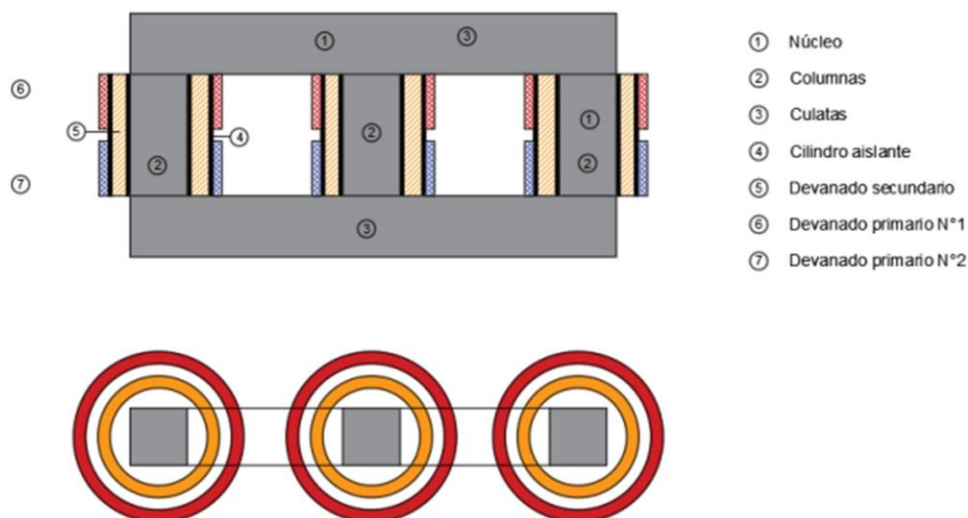


Figura 14 Propuesta de diseño de transformador de tres devanados

2.3 Conductores

Los conductores serán subterráneos tipo Sintenax de la marca Prysmian con formación 3x150/50, directamente enterrados. Los conductores se escogen por corriente máxima y luego son verificados por caída de tensión y cortocircuito.

En este caso, el método de canalización es el denominado D2 (directamente enterrado). La corriente admisible del mismo es de 325 A.

2.3.1 Verificación por corriente máxima

Debido a la corriente que debe soportar cada tramo es de 289 A, se eligen los siguientes conductores y se verifican que:

$$I_n < I_z$$

Donde:

- I_n : Corriente de carga.
- I_z : Corriente admisible por el conductor.

Sección nominal	Método D1 Caño enterrado	Método D1 Caño enterrado	Método D2 Directamente enterrado	Método D2 Directamente enterrado	Método D2 Directamente enterrado
mm ²	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
1,5	25	20	28	29	25
2,5	33	27	37	39	34
4	43	35	47	51	44
6	53	44	59	65	55
10	71	58	80	88	74
16	91	75	104	112	95
25	117	96	134	137	117
35	140	115	162	164	140
50	-	137	198	-	173
70	-	169	240	-	211
95	-	201	280	-	254
120	-	228	324	-	290
150	-	258	363	-	325
185	-	289	405	-	369
240	-	333	475	-	428
300	-	377	533	-	484

Figura 15 Corrientes admisibles de conductores

2.3.2 Verificación por caída de tensión

Luego, se verifica que la caída de tensión en los mismos tramos cumpla con las especificaciones establecidas por la Norma AEA 90634. Para el cálculo de la caída de tensión, se utiliza el siguiente método:

$$\Delta U = k * I * L * (R * \cos\phi + X * \sin\phi)$$

- k: 2 para líneas monofásicas y 1,73 para trifásicas
- I: Corriente transportada (A)
- L: Longitud en km
- R: resistencia del cable
- X: reactancia del cable

En la siguiente tabla, se observan las verificaciones por caída de tensión:

Descripción	L(km)	Icarga(A)	Formación	I cable(A)	R(Ω)	X(Ω)	ΔV(V)	ΔV(% nom)
Alimentador Generador-Trafo	0,02	289	3x(150/70) mm ²	325	0,341	0,079	3,32	0,87

Tabla 4 Tabla verificación caída de tensión

Como la caída de tensión es menor al 1% de la tensión nominal(380V), el conductor verifica

2.3.3 Verificación contra Cortocircuitos

Para cortocircuitos de una duración entre 0,1 a 0,5 seg, se puede alcanzar la temperatura máxima admisible e incluso superarla. Si se cumple la siguiente condición, el conductor se considera protegido:

$$S \geq \frac{I_{cc} \sqrt{t}}{k}$$

Donde:

- t: Tiempo de desconexión en segundos.
- I_{cc}: Corriente de cortocircuito en cualquier punto del circuito.
- K: Factor de acuerdo con el tipo de conductor y material aislante. (143 para el cable seleccionado)
- S: Sección del conductor.

Calculamos la corriente de cortocircuito a partir de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión.

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} V}$$

Donde:

- Scc: Potencia de cortocircuito.
- V: Tensión de servicio.

Potencia de Cortocircuito (KVA)	Tensión (V)	I _{cc} (kA)	t(seg)	Sección mínima (mm ²)	Sección elegida	Verificación S>S _{min}
2424,24	380	6,38	0,5	31,52	150	Si

Tabla 5 Tabla verificación del conductor contra cortocircuitos

Tabla Resumen-Datos del Conductor		
Descripción	Unidad	Valor Especificado
Norma	-	IRAM 2178
Tipo de Conductor	-	Subterráneo
Formación	mm ²	3x120/50
Material	-	Cobre
Corriente Admisible	A	290
Resistencia	Ω	0,341
Reactancia	Ω	0,079
Tensión Nominal	kV	0,6/1,1

Tabla 6 Tabla Resumen -Datos del Conductor

2.4 Puesta a Tierra

El Esquema de conexión a tierra, ECT (también conocido como Régimen de Neutro) especifica la forma en la que se relacionan el secundario del transformador Media Tensión-Baja Tensión y las masas metálicas con el potencial 0 (Tierra) en una instalación eléctrica.

Todos los esquemas, en combinación con otros dispositivos de protección, garantizan la seguridad de las personas frente a los contactos indirectos debidas a fallos de aislamiento. Su principal diferencia radica en la continuidad del suministro eléctrico.

Los esquemas de conexión a tierra se nombran con dos letras:

- Primera letra: Conexión del neutro del transformador. T(Tierra), I(Independiente)
- Segunda letra: Conexión de las masas metálicas de la instalación. T (Tierra), N(Neutro).

Como la Planta está alimentada en baja tensión, por reglamentación AEA, el esquema de conexión a tierra debe ser TT.

2.4.1 Esquema de conexión TT

El esquema de conexión TT tiene un punto del sistema de alimentación (generalmente el neutro) conectado directamente a una toma de tierra (tierra de servicio), por el proveedor de la energía eléctrica y las masas eléctricas de la instalación consumidora conectadas a través de un conductor de protección llamado PE y de un conductor de puesta a tierra, a otra toma de tierra (tierra de protección) eléctricamente independiente de la toma de tierra

de servicio.

Según reglamentación, se establece que el valor máximo permanente de la resistencia de puesta a tierra de protección debe ser menor o igual a 40Ω .

En la siguiente figura se muestra el esquema TT, con el recorrido de una corriente de defecto a tierra a través del lazo de falla.

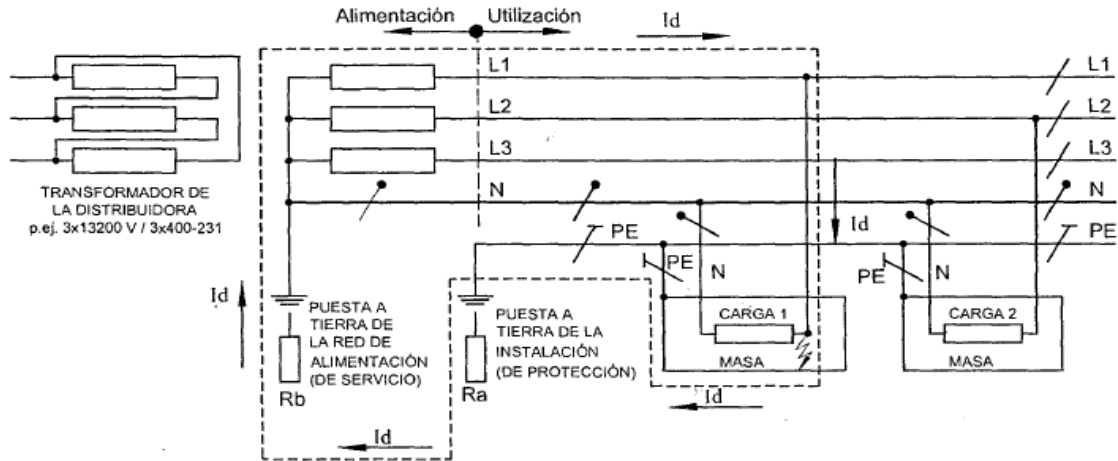


Figura 16 Esquema de conexión a tierra TT

Donde:

- Carga 1, carga 2: diferentes cargas dentro del inmueble.
- PE: Conductor de protección de la instalación del inmueble, conectado a la puesta tierra de protección, independiente de la puesta a tierra de servicio de la empresa distribuidora de energía eléctrica.
- Id: Intensidad de corriente de defecto.
- Ra: Resistencia de la puesta a tierra de protección de la instalación consumidora.
- Rb: Resistencia de la puesta a tierra de servicio de la red de alimentación.

Actualmente, el interruptor diferencial se encuentra dentro de la instalación, y no en el Pilar de Medición como exige la distribuidora Edersa. En el pilar solamente existe un seccionador fusible.

Si en algún momento la empresa distribuidora exige que se regularice la situación, el transformador de tres devanados no podrá colocarse debido a que la generación haría que accione el interruptor diferencial del Pilar de Medición.

2.5 Protecciones

Con el fin de proteger la instalación, se instalarán los siguientes elementos protectores.

2.5.1 Interruptores Automáticos

Estos aparatos están destinados a proteger el circuito contra sobrecargas y cortocircuitos.

Los mismos serán del tipo Caja Moldeada, de corriente nominal 400A para los tres casos: las dos entradas y salidas.

Las normas IEC 60947 y IEC 60898 fijan las características de disparo de las protecciones de los interruptores automáticos.

Un interruptor automático contiene dos protecciones independientes para garantizar:

- Protección contra sobrecargas: Su característica de disparo es a tiempo dependiente o inverso.
- Protección contra cortocircuitos: Su característica de disparo es a tiempo independiente.

2.5.2 Relé de Protección Inversa

El Relé de Potencia inversa es un dispositivo que reacciona con el sentido de flujo de la energía. Normalmente la energía fluye del generador hacia la carga. Sin embargo, en aplicaciones en donde hay varios generadores trabajando en paralelo puede ocurrir que uno de ellos empiece a trabajar no como generador sino como motor. Esta acción es protegida por este equipo.

Este relé se puede acoplar al interruptor automático o al equipo de sincronismo. Para el funcionamiento del mismo, es necesario instalar transformadores de corriente y transformadores de tensión.

En la siguiente figura se puede observar un diagrama simplificado de la instalación del mismo.

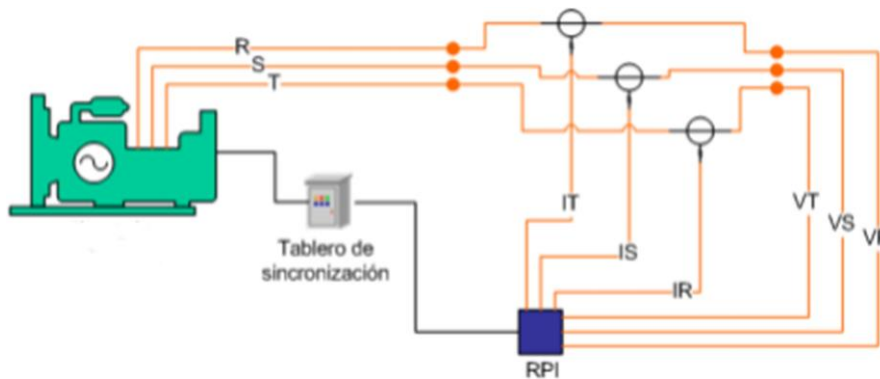


Figura 17 Esquema de protección de Relé Inverso

La protección de potencia inversa se aplica para evitar el flujo de potencia activa en una determinada dirección y se calcula a partir de la tensión y la corriente que mide el relé.

$$P = V_a I_a \cos \varphi_a + V_b I_b \cos \varphi_b + V_c I_c \cos \varphi_c$$

La protección de potencia inversa se aplica a los generadores y su ajuste se hace en función de la potencia nominal. Para ello se debe considerar una temporización que permita evitar falsas actuaciones cuando la máquina absorbe potencia sincronizante o cuando se produce una oscilación de potencia.

Las pérdidas totales expresado en porcentajes de la potencia nominal y operando a velocidad nominal son:

- Turbinas a vapor 1 - 3%
- Máquinas diesel 25%
- Turbina hidráulica 3%
- Turbina a gas 5%

Los ajustes de la potencia a detectar por los relés de inversión de potencia se calculan en función a los porcentajes anteriores y su temporización puede estar dentro del orden de los 5 a 10 s.

El relé se ajustará para que actúe a una potencia del 5%, es

decir: $P_{inv} = 0,05 \cdot 180\text{kW} = 9\text{kW}$

Es decir, cuando el generador reciba una potencia de 9kW, actuará el relé.

2.5.3 Transformador de Corriente

Son aparatos en que la corriente secundaria, dentro de las condiciones normales de operación, es prácticamente proporcional a la corriente primaria, aunque ligeramente desfasada. Desarrollan dos tipos de función: transformar la corriente y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión. El primario del transformador, que consta de muy pocas espiras, se conecta en serie con el circuito cuya intensidad se desea medir y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los aparatos de medición y de protección que requieran ser energizados.

El transformador de corriente de la planta, constará de un núcleo secundario, destinado a la protección. El mismo se conectará al relé de protección inversa.

Las características del mismo son las siguientes:

- Relación del transformador: 400/5 [A]
- Icc máxima: 18kA
- Tensión nominal de aislamiento: 5kV
- Clase de precisión: 0.5 a 5 VA
- 1 a 8 VA

2.5.4 Conmutador Automático

El funcionamiento de la planta requiere de un servicio de energía ininterrumpido, es por esto que para lograrlo y poder conectar el sistema de generación cuando sea solicitado, se instalará en la planta un conmutador automático.

El conmutador automático es un dispositivo que se utiliza para controlar dos redes eléctricas, en este caso la red eléctrica y el sistema de generación de la Planta.

En modo automático, el control detectará la desconexión de la red eléctrica con un temporizador programable, dando orden del arranque del sistema de generación, validando la tensión y frecuencia proveniente. Transferirá la carga conmutando entre red-sistema quedando la instalación alimentada por la energía proveniente del sistema de generación.

Cuando la red vuelve a estar disponible, el conmutador automático electrónico verifica si la energía que proviene de la compañía dentro de los parámetros correctos y después de una temporización programable transferirá la carga conmutante a posición de red.

Después de la transferencia, el control comienza la secuencia de parada del sistema de generación, que queda preparado para otra incidencia en la red.

El conmutador automático a instalar deberá cumplir con los siguientes requisitos:

Tabla Resumen-Datos del Conductor		
Descripción	Unidad	Valor Especificado
Tensión Nominal	V	380
Rango de tensiones operacionales	-	0,7-1,3 Ue
Frecuencia	Hz	50
Corriente Nominal	A	300
Tiempo de Transferencia	s	2,5

Tabla 7 Tabla Resumen Conmutador automático

Capítulo 3

Con la posibilidad de poder alimentar la carga de la planta a través de la red de BT existente y algún sistema de generación, con niveles de tensión diferentes entre sí, es conveniente utilizar un transformador de tres circuitos o devanados.

El uso de transformadores de tres devanados ofrece flexibilidad operativa para la distribución de la energía eléctrica, interconectando un generador eléctrico, la red de distribución en BT y cargas en diferentes niveles de tensión.

Como ejemplo práctico de su uso y ventajas, se analiza la filosofía operativa a utilizar por primera vez para la reconfiguración del esquema eléctrico principal de la planta Química Del Valle SRL. Donde en el primario se conecta un generador de energía eléctrica, en el secundario se conecta la red de distribución de BT, y en el tercero se conecta el transformador-rectificador que alimenta las celdas electrolíticas.

Una óptima selección de las aplicaciones de transformadores de tres devanados debe considerar los siguientes factores:

- Limitaciones de los valores de impedancia de los devanados proporcionados por los fabricantes, que son valores económicamente costeables.
- Regulación de tensión en las terminales de los transformadores en condiciones de operación normal y anormal.
- Niveles de corriente de cortocircuito diferentes en cada devanado.

3.1 Diagramas de secuencia cero para transformadores de tres devanados

En la figura 18 se muestra el circuito equivalente de un transformador de tres devanados.

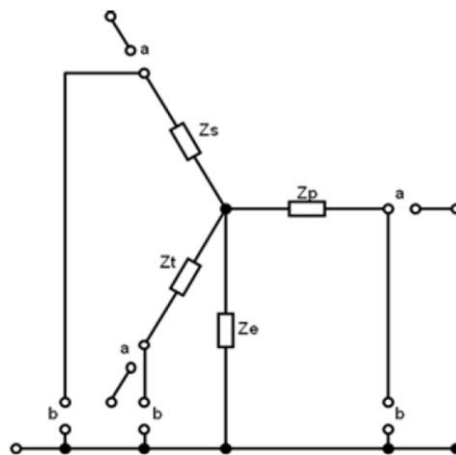


Figura 18 Circuito equivalente de las conexiones más comunes y prácticas para transformadores de tres devanados.

Para realizar una adecuada protección de falla a tierra es necesario considerar la conexión de los devanados para aislar la corriente de falla a tierra. Así como, la corriente de secuencia cero esté limitada y confinada en cada uno de los devanados, esto facilita la coordinación de protecciones por falla a tierra. En la Fig. 19 se muestran los principales diagramas de secuencia cero para los arreglos típicos.

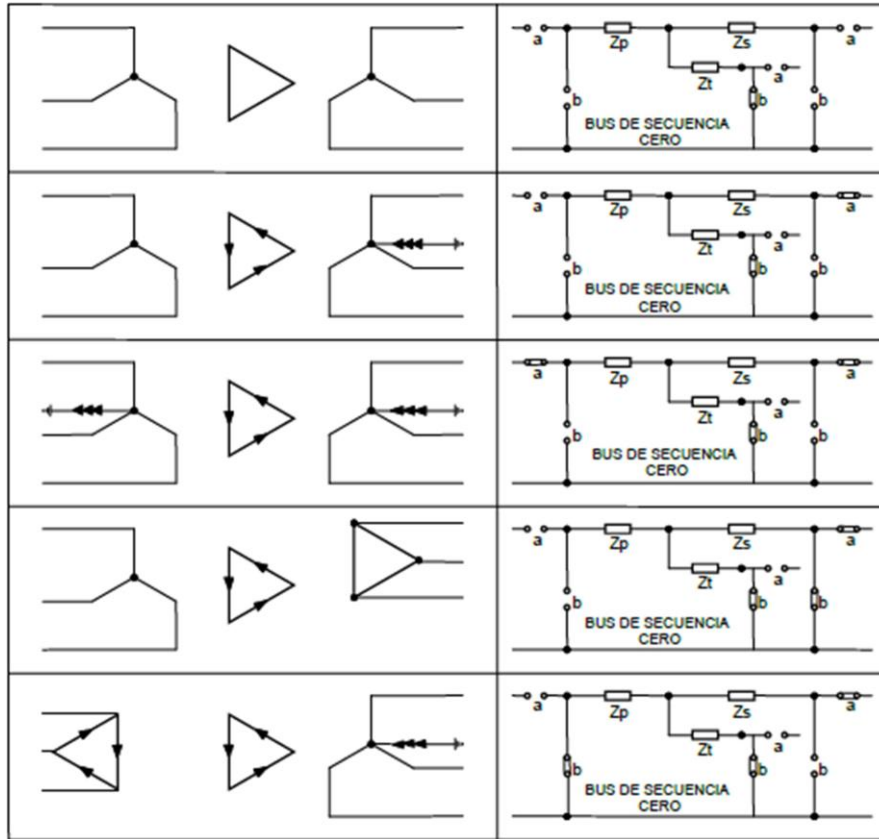


Figura 19 Arreglo de conexión de los devanados y su diagrama de secuencia cero equivalente.

El flujo de corrientes de secuencia cero en un transformador, sólo es posible cuando el transformador forma parte de un circuito cerrado para corrientes unidireccionales y el balance de espiras-amperes se mantiene entre devanados. El circuito equivalente de secuencia positiva aún se mantiene para representar el transformador, pero se tienen ciertas condiciones a la conexión en el circuito externo. El valor de la impedancia de excitación es mucho más pequeño que para el circuito de secuencia positiva, aproximadamente entre uno y cuatro por unidad, pero sigue siendo lo suficientemente alto para ser despreciado en la mayoría de los estudios de fallas. El tipo de conexión de un transformador al circuito externo se determina tomando en cuenta la configuración de cada devanado y su conexión a tierra.

Las corrientes de secuencia cero pueden circular dentro y fuera de un devanado, la terminal del devanado se conecta al circuito externo (es decir, el enlace "a" está cerrado,

en la Fig. 19). Si las corrientes de secuencia cero circulan en el devanado sin que haya un flujo en el circuito externo, la terminal del devanado se conecta directamente al bus de secuencia cero (es decir, el enlace “b” está cerrado en la Fig. 19).

Las excepciones a la regla general de despreciar la impedancia de magnetización ocurren cuando el transformador está conectado en estrella/estrella y uno o ambos neutros están aterrizados. En estas circunstancias, el transformador se conecta al bus cero a través de la impedancia de magnetización. Cuando un banco de transformador trifásico se configura sin interconexión de flujo magnético (es decir, de tipo armazón trifásico o de tres unidades monofásicas) y siempre que haya una trayectoria para corrientes de secuencia cero, la impedancia de secuencia cero es igual a la impedancia de secuencia positiva.

En el caso de unidades del tipo de núcleo trifásico, los flujos de secuencia cero producidos por las corrientes de secuencia cero pueden encontrar una trayectoria de alta reluctancia, en consecuencia, la impedancia de secuencia cero se reduce alrededor de un décimo.

Sin embargo, en cálculos, es práctico ignorar esta variación y considerar del mismo valor las impedancias de secuencia positiva y de secuencia cero.

3.2 Impedancias

La impedancia de los transformadores depende principalmente de la corriente de corto circuito a manejar en cada sistema, pero a su vez de la relación entre los diferentes devanados, es decir, se tiene una impedancia entre el primario y el secundario y el primario y terciario y el secundario y terciario.

Si se desprecia la impedancia de excitación, el circuito equivalente de un transformador de tres devanados se puede representar por una estrella de impedancias, como se muestra en la Fig. 23, donde 1, 2 y 3 son los devanados primario, secundario y terciario, respectivamente. La impedancia de cualquiera de estas derivaciones se puede determinar si se considera la impedancia de corto circuito entre pares de devanados, con el tercero abierto. El valor de la impedancia está dada por las siguientes relaciones [1]:

$$Z_1 = (Z_2 + Z_3)$$

$$Z_2 = (Z_1 - Z_3)$$

$$Z_3 = (Z_1 - Z_2)$$

Por lo anterior;

$$Z_1 = \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{13} - Z_{32})$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{32} - Z_{13})$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} (Z_{13} + Z_{32} - Z_{12})$$

[1] El desarrollo matemático y físico de las ecuaciones mencionadas, puede verse en Anexos.

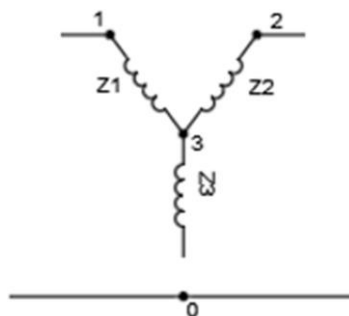


Figura 20 Circuito equivalente de un transformador de tres devanados.

3.2.1 Resumen de la teoría del transformador de tres circuitos.

El anterior estudio de la teoría del transformador de tres circuitos puede resumirse de la manera siguiente:

Los problemas en los que intervienen los efectos de un transformador de tres circuitos como elemento de impedancia- tales como los referentes a la regulación de tensión, corrientes de cortocircuito y división de la carga entre circuitos o entre transformadores en paralelo- pueden resolverse con ayuda de un circuito equivalente.

Cuando pueda considerarse conectado a un terminal de cada devanado a los terminales correspondientes de los otros dos devanados, el transformador de tres circuitos puede representarse por un circuito equivalente de cuatro terminales y seis ramas.

Cuando se desprecia la corriente de excitación, el circuito equivalente del transformador de tres circuitos se reduce a una red de tres terminales que puede representarse por un montaje triangulo o estrella de elementos de circuito. El montaje en estrella es, generalmente, el más útil, ya que las impedancias que representan al transformador se hallan entonces en serie con las impedancias de los circuitos exteriores y pueden combinarse con ellas fácilmente.

Las impedancias del circuito equivalente conectado en estrella del transformador de tres circuitos pueden determinarse fácilmente a partir de las impedancias equivalentes o en cortocircuito de cada par de terminales considerador como transformador de dos circuitos, según se indica en las ecuaciones (41), (42) y (43).

Antes de continuar con el siguiente capítulo, donde se mencionarán distintos tipos de generación, es necesario realizar una conclusión de los capítulos anteriores.

El análisis del consumo durante el período de 2020 determinó que el transformador a instalar deberá tener una potencia de 200kVA. A su vez, se determinó que la conexión del mismo será Delta-Estrella-Estrella, para que el sistema de generación no aporte a la corriente de secuencia cero.

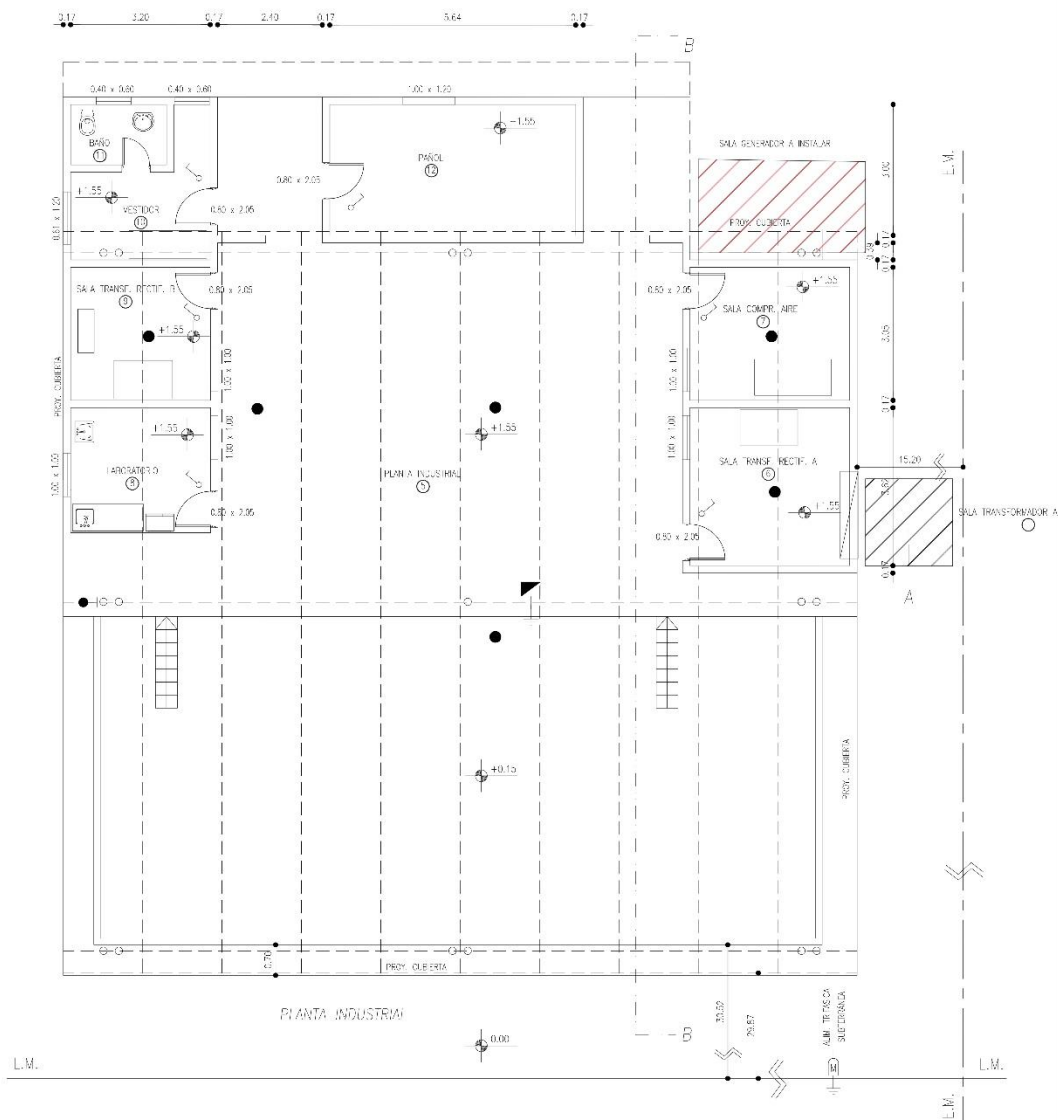
Con el valor de potencia obtenido anteriormente, se procedió a calcular los conductores, que tendrá que ser de 3x120/70 mm² de sección, del tipo Sintenax, directamente enterrado.

Para proteger la instalación es necesario colocar distintos dispositivos, estos son:

- Interruptor Termomagnético Automático de Caja Moldeada, de 400 A de corriente nominal para las dos entradas, y la salida.
- Relé de Protección inversa, con el fin de proteger tanto a la red como al generador ante un flujo de corriente inverso, es decir, desde el generador hacia la red, o viceversa.
- Para el funcionamiento de los dispositivos mencionados anteriormente, es necesario instalar transformadores de corriente, con relación de transformación 400/5 A.

También, para acoplar el sistema de generación a la red de forma instantánea, o con un corto lapso de tiempo de conexión, se deberá instalar un conmutador automático. Cuando este dispositivo detecta la falta de suministro eléctrico de la red, envía una orden al sistema de generación para que encienda y se transfiera la carga hacia este con los valores determinados por la red.

Para analizar los problemas en los que intervienen los efectos de un transformador de tres circuitos como elemento de impedancia- tales como los referentes a la regulación de tensión, corrientes de cortocircuito y división de la carga entre circuitos o entre transformadores en paralelo-se puede utilizar el circuito equivalente. Es por esto que en el capítulo 3 se realiza el análisis de las impedancias y su conexión.



4.1 Sistemas de Generación

La generación de energía eléctrica engloba al conjunto de procesos distintos a través de los cuales puede producirse electricidad, o lo que es lo mismo, transformar otras formas de energía disponibles en la naturaleza (energía química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, etc.) en energía eléctrica aprovechable.

Las fuentes de energía las podemos clasificar en:

- Fuentes renovables: son las que la naturaleza las renueva con rapidez, y podemos obtener energía de forma continua
- Fuentes no renovables: son las que se encuentran en la Tierra y se agotan con su utilización, porque las cantidades son limitadas
- Fuentes convencionales: son las que aportan la mayor cantidad de energía útil de un país.
- Fuentes no convencionales: son las que, por falta de avance tecnológico o por sus costos elevados de extracción y aprovechamiento, no producen mucha cantidad de energía útil.

4.1.1 Generación a través de Grupo Electrónico

Un grupo electrónico es una máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna.

Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico. Así mismo, la legislación de los diferentes países puede obligar a instalar un grupo electrónico en lugares en los que haya grandes densidades de personas, como hospitales, centro de datos, centros comerciales, restaurantes, cárceles, edificios administrativos, etc.

Una de las utilidades más comunes es la de generar electricidad en aquellos lugares donde no hay suministro eléctrico. Generalmente son zonas apartadas con pocas infraestructuras y muy poco habitadas. Otro caso sería en locales de pública concurrencia: hospitales, fábricas, etc., lugares en los que la energía eléctrica de red es insuficiente y es necesaria otra fuente de energía alterna para abastecerse.

Los grupos electrónicos están formados por diversos elementos: el motor, que proporciona la fuente de energía mecánica para que el alternador gire y genere electricidad, el regulador del motor, que mantiene una velocidad constante del motor con relación a los requisitos de carga, el sistema eléctrico del motor, el sistema de refrigeración, que puede ser de agua, aceite o aire, el alternador, el depósito de combustible y bancada, el aislamiento de la vibración, el sistema de escape, el interruptor automático de salida, etc.

Para la elección del grupo electrógeno se tienen en cuenta las siguientes características principales:

- Potencia nominal: En este caso, la planta requiere un grupo de 200kVA de potencia nominal.
- Tensión nominal: Según el generador a instalar (puede ser en MT o en BT).
- Combustible: Diesel o Gas natural.
- Lugar de la instalación: Intemperie o exterior.

El consumo según el tipo de combustible es el siguiente:

- Gas natural: 44 m³/hora (al 100% de carga)- Presión: 20 mbar (red domiciliaria)
- Diesel: 48 litros/hora (al 100% de carga).

Una ventaja del grupo electrógeno alimentado con gas natural, es que puede ser directamente conectado a la red domiciliaria.



Figura 21 Generador de MT a Gas



Figura 22 Generador de MT a Diesel

4.1.2 Generación a través de Hidrogeno

Actualmente, en la planta, el hidrogeno generado por el proceso de electrolisis es liberado al ambiente.

Es por ello que a través de diversos estudios podría verse la posibilidad de utilizar el hidrogeno para la generación de electricidad, ya sea a través de una pila de combustible, o un motor a combustión.

Para el caso de la Planta, lo mas factible para generar electricidad con el Hidrogeno, es implementar un motor a combustión, reemplazando el combustible fósil por hidrogeno.

El funcionamiento de este motor es muy similar al de uno de combustible fósil. El hidrógeno se usa como combustible y el oxígeno como comburente. La reacción química es iniciada por la chispa, que puede ser producida por unas bujías.

4.1.3 Generación Fotovoltaica

El generador fotovoltaico elemental es la célula fotovoltaica, fabricada en general apartir de silicio monocristalino, silicio policristalino o silicio amorfo. Al exponerse a la radiación solar, se comporta como un generador de corriente. Las celdas solares pueden agruparse formando módulos o paneles y estos, a su vez, se agrupan constituyendo arreglos fotovoltaicos. Estos arreglos pueden estar ubicados en una posición fija o pueden contar con bases móviles que permiten cambiar su orientación para mejorar la eficiencia de colección del recurso solar. Por otro lado, teniendo en cuenta que la tensión y la corriente disponibles en los terminales del panel varían en función de la temperatura de operación, la irradiación y la carga, es necesario incorporar convertidores electrónicos que regulen la tensión y la corriente, de manera de encontrar el punto en que el dispositivo fotovoltaico entregue la mayor potencia. Dentro de las instalaciones fotovoltaicas, se pueden identificar dos tipos: aquellas que se encuentran aisladas (off-grid) y las conectadas a la red eléctrica (grid-connected).

La instalación deberá contar con un sistema de paneles solares según el requerimiento de potencia planteado anteriormente. Estos paneles se conectan en una combinación serie-paralelo, sin banco de baterías.

El sistema fotovoltaico va conectado a un sistema de inversores, el cual se encarga de transformar los valores de las señales generadas en continua a una señal de 50 Hz pura en fase con la frecuencia de la señal de la red eléctrica.

4.1.3.1 Cálculo estimativo para la generación solar

Se realizó en este proyecto un cálculo sencillo y estimado de una central fotovoltaica.

Para el cálculo de la central fotovoltaica, se fija primero la potencia de la central. A partir de ahí se eligen los inversores.

Se realizará el cálculo para cuatro posibilidades:

- 25% de la potencia total.
- 50% de la potencia total.
- 75% de la potencia total.
- 100% de la potencia total.

Porcentaje sobre el total	Consumo prom.(kW/H)	Pot. Absorbida Promedio (kW)	Pot.Reactiva (kVAr)	Pot.Aparente (kVA)	Corriente (A)
25%	20840,625	28,945	24,38	37,845	57,5675
50%	41681,25	57,89	48,76	75,69	115,135
75%	62521,875	86,835	73,14	113,535	172,7025
Total	83362,5	115,78	97,52	151,38	230,27

Tabla 7 Tabla Resumen de Potencia y Corrientes

Número máximo de módulos por rama

El valor máximo de la tensión de entrada al inversor corresponde a la tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico cuando la temperatura del módulo es mínima. La temperatura del módulo mínima corresponde a una temperatura ambiente mínima de 5°C y una irradiancia mínima de 40 w/m2. Estos datos son obtenidos de la página web del INTA (medición de la estación meteorológica automática Alto Valle).

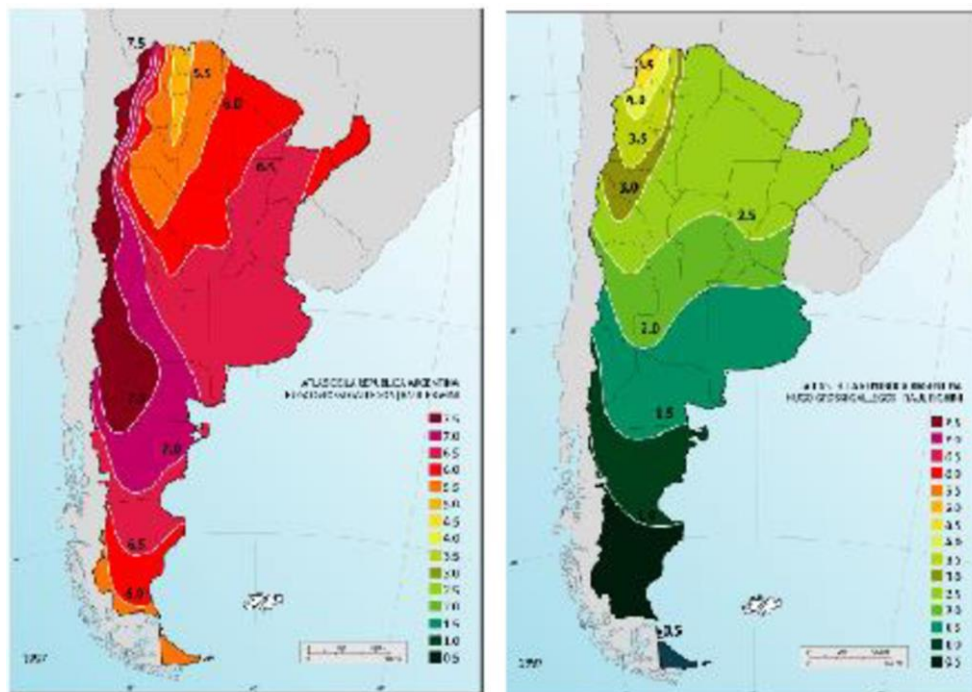


Figura 23 Irradiancia en Argentina

La temperatura del módulo está dada por la siguiente ecuación:

$$T_p = T_a + \left(\frac{T_{ONC} - 20}{800} \right) I$$

Donde:

- T_p : Temperatura del módulo [$^{\circ}\text{C}$].
- T_a : Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$].
- T_{ONC} : Temperatura nominal de funcionamiento de la celda [$^{\circ}\text{C}$].
- I : Irradiancia [W/m^2].

En un día de invierno soleado puede ocurrir que el inversor se pare, por ejemplo debido a una falla en la red y que al volverse a encender puede darse una tensión en circuito abierto alta en la central fotovoltaica y por ello el inversor no arranque. Por esto, la tensión en circuito abierto de la central debe ser siempre inferior a la tensión máxima de entrada en el inversor. De lo contrario el inversor además de no funcionar se podría dañar. Por éste motivo el número máximo de módulos por ramal conectados en serie se determina como el cociente entre la tensión máxima de entrada al inversor y la tensión en circuito abierto del módulo a su temperatura mínima.

La tensión en circuito abierto del módulo se determina de la siguiente manera:

$$U_{ca(Tmin)} = U_{ca(STC)} - [(25^{\circ}\text{C} + T_p)\Delta V]$$

Donde:

- U_{ca} : Tensión en circuito abierto [V]
- ΔV : Variación de la tensión [$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$]

El número máximo de módulos por ramal corresponde:

$$N_{\text{máx}} = \frac{U_{\text{max(inv)}}}{U_{ca(Tmin)}}$$

Donde:

- U_{max} : Tensión máxima de entrada en el inversor [V].
- U_{ca} : Tensión en circuito abierto [V].

Número mínimo de módulos por rama

El número mínimo de módulos por rama viene limitado por la tensión mínima de entrada al inversor y la tensión en el punto de máxima potencia del módulo a una temperatura aproximada de 70°C.

El valor mínimo de la tensión de entrada al inversor debe ser menor o igual que la tensión de máxima potencia mínima del generador fotovoltaico que corresponde cuando la temperatura del módulo es máxima.

Cuando la tensión en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico está por debajo de la tensión de entrada mínima del inversor en la que actúa como seguidor del punto de máxima potencia el inversor no será capaz de seguir el punto máxima potencia del generador fotovoltaico o incluso, en el peor de los casos que se apague.

La tensión de máxima potencia del módulo está determinada por la siguiente formula:

$$U_{PMP(T_{\max})} = U_{PMP(STC)} + [(T_{\max} - 25^{\circ}C)\Delta V]$$

Donde:

- U_{PMP} : Tensión de máxima potencia del módulo [V].
- ΔV : Variación de la tensión [mV/°C].

El número máximo de módulos por ramal corresponde a:

$$N_{\max} = \frac{U_{PMP(inv)}}{U_{PMP(T_{\max})}}$$

Donde:

- $U_{PMP} (inv)$: Tensión mínima de seguimiento del punto de máxima potencia [V].
- $U_{PMP} (70^{\circ}C)$: Tensión de máxima potencia a la temperatura máxima del módulo [V].

Número de ramas en paralelo

El número de ramales en paralelo debe cumplir que la corriente de cortocircuito máxima de un ramal por el número de ramales conectados en paralelo sea menor que la corriente máxima admisible de entrada al inversor.

$$N_{\text{máx}} = \frac{I_{\text{max(inv)}}}{I_{\text{cc(ramal)}}$$

Donde:

- $I_{\text{máx(inv)}}$: Intensidad máxima de entrada al inversor [A].
- $I_{\text{cc(ramal)}}$: Intensidad de cortocircuito de cada ramal [A].

Datos

Paneles Solares

Salida	Valor
Potencia	340 W
Tensión Nominal	38.30 Vcc
Corriente (Imp)	8.88 A
Corriente en Cortocircuito (Isc)	9.38 A
Tensión en vacío (Vo)	46.80 Vcc
Coefficiente de temperatura	
Coefficiente de temperatura de Pot. Máx	-0.47%/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0.34%/°C
Coefficiente de temperatura de Isc	0.05%/°C
Temperatura Nominal	45°C



Figura 24 Características de los paneles solares

Inversores:

% Potencia suministrada	Potencia demandada [kW]	Pot. Nominal del Inversor [kW]	Tensión máxima de entrada del Inversor [V]	Tensión mínima de seguimiento del Inversor [V]	Corriente máxima de entrada del Inversor [A]
25	28,95	30	700	420	76
50	57,89	100	700	420	250
75	86,83	100	700	420	250
100	115,78	150	700	420	375

Figura 25 Características de los inversores

Resultados

RESULTADOS							
% Potencia suministrada	Pot. Nominal del Inversor [kW]	Temperatura del módulo Tp[°C]	Tensión en circuito abierto Uca [V]	N° máximo por ramal	Tensión de máxima potencia en el módulo Upmp [V]	N°mínimo por ramal	N° máximo de ramas en paralelo
25	30	6,25	51,8	13,51	45,5	9,23	8,56
50	100	6,25	51,8	13,51	45,5	9,23	28,15
75	100	6,25	51,8	13,51	45,5	9,23	28,15
100	150	6,25	51,8	13,51	45,5	9,23	42,23

Tabla 8 Tabla Resumen de resultados parciales

Dado los resultados, se decide por colocar 12 paneles por ramal. Luego, dependiendo de la potencia a suministrar, se colocarán en paralelo el número de ramas necesario:

$$N^{\circ} \text{ de Paneles} = \frac{P_i}{P_{\text{panel}}}$$

Donde:

- Pi: Potencia a suministrar
- P_{panel} = Potencia entregada por cada panel

% Potencia suministrada	Potencia a suministrar [kW]	Cantidad de paneles necesarios	Cantidad de ramas en paralelo necesarias	Cantidad de ramas a instalar	Cantidad de paneles a instalar	Potencia total instalada [kW]
25	30	88,24	7,35	8	96	32,64
50	60	176,47	14,71	15	180	61,2
75	90	264,71	22,06	23	276	93,84
100	120	352,94	29,41	43	516	175,44

Tabla 9 Tabla Resumen Resultados Finales

4.2 Generación en Paralelo

Con algún sistema de generación de los anteriormente mencionados se podrá a través del transformador de tres devanados, realizar un aporte de energía a la carga de la Planta, de manera que dicho aporte sea en paralelo al proveniente de la Red externa (en este caso, de Edersa).

Con esto, se logrará abastecer a la planta con diferentes configuraciones:

- A través de la red de energía eléctrica existente, de forma exclusiva.
- A través del generador instalado, de forma exclusiva.
- A través del generador instalado y la red eléctrica existente, de forma compartida.

El funcionamiento del sistema es el siguiente: antes de poner en marcha el generador, la carga será alimentada desde la red hasta que quede operativo el sistema de generación. Una vez que suceda esto, la carga empezará a recibir potencia desde la red y el generador. Si el generador no pudiese abastecer de energía a la carga de forma independiente, la red aportará la energía restante para abastecer la misma.

Podría ocurrir que ante una desconexión de la carga, por mantenimiento o por alguna falla en la misma, que el flujo de potencia sea desde la red hacia el generador, pudiendo dañar el mismo. Es por esto que se coloca un relé de protección inversa, mencionado en el Capítulo 2. Si fuese al revés, no habría inconveniente ya que el generador aportaría a la Red, aunque para obtener beneficios económicos debería solicitarse un medidor bidireccional.

Capítulo 5

Una vez determinado todos los elementos necesarios para la instalación, gastos de energía mensual y el costo de dichos gastos, es posible estimar el ahorro que se podría obtener año a año, y la factibilidad económica del proyecto.

5.1 Estudio de Costos

Los valores y montos asignados resultan de investigaciones en internet y consultas a distintos profesores, con el fin de encontrar la mejor oferta que garantice la relación costo-calidad del mismo asegurando hacer un cálculo óptimo de la instalación. Los valores para los materiales han sido calculados en dólares, mientras que para la mano de obra se realizaron en pesos argentinos.

Dichos valores han sido presupuestados a Julio de 2022 y considerando un valor de dólar oficial de \$145 por cada US\$ 1.

Para el caso de los materiales de la instalación, se ha discriminado entre Sistema de Conexión y Sistema de Generación.

Sistema de Conexión:

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL-SISTEMA DE CONEXIÓN					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Transformador	Transformador de tres devanados, 380/380/380 V, 200kVA	1	un.	USD 40.000,00	USD 40.000,00
	Recinto para alojar el transformador	4	mts2	USD 300,00	USD 1.200,00
Conductor	Cable tipo Sintenax 3x120/70 mm2	20	m	USD 200,00	USD 4.000,00
Protecciones	Interruptor Termomagnético Automático de Caja Moldeada 4x400A con regulación (0,7-1 In)	2	un.	USD 1.400,00	USD 2.800,00
	Rele de protección inversa 380V, corriente de entrada 5A	2	un.	USD 500,00	USD 1.000,00
	Transformador de Corriente 400/5A, Clase 0,5, 8VA	6	un.	USD 80,00	USD 480,00
	Conmutador automático 380V, Rango 0,7-1,3 Ue, 300A	1	un.	USD 700,00	USD 700,00
TOTAL					USD 50.180,00

Tabla 10 Tabla Costos de Materiales del Sistema de Conexión

PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA-SISTEMA DE CONEXIÓN					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Transformador	Instalación del Transformador	1	un.	\$ 1.450.000,00	\$ 1.450.000,00
	Recinto para alojar el transformador	4	mts2	\$ 21.750,00	\$ 87.000,00
Conductor	Zanjeo, tendido de conductor subterráneo	20	m	\$ 7.250,00	\$ 145.000,00
Protecciones	Armado de Gabinete de Protecciones	1	un.	\$ 72.500,00	\$ 72.500,00
TOTAL					\$ 1.754.500,00

Tabla 11 Tabla Costos de Mano de obra del Sistema de Conexión

Sistema de Generación Solar:

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL-SISTEMA DE GENERACIÓN					
Generador Solar	Inversor 200kW, 300A	1	un.	USD 35.000,00	USD 35.000,00
	Panel Fotovoltaico 340W	516	un.	USD 300,00	USD 154.800,00
	Estructura Aluminio para Modulo Fotovoltaico	516	un.	USD 30,00	USD 15.480,00
	Accesorios (Fichas, conectores, etc)	516	un.	USD 4,00	USD 2.064,00
TOTAL					USD 207.344,00

Tabla 12 Tabla Costos de Materiales del Sistema de Generación Solar

PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA-SISTEMA DE GENERACION					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Generador Solar	Instalación Llave en mano por Panel Solar	516	un.	\$ 29.000,00	\$ 14.964.000,00
TOTAL					\$ 14.964.000,00

Tabla 13 Tabla Costos de Mano de obra del Sistema de Generación Solar

Sistema de Generación Diesel:

El cálculo de la cantidad de combustible mensual que deberá suministrarse al generador se estimó de la siguiente manera:

Cantidad (Litros/mes)= Cantidad de horas de uso por día x Consumo combustible/hora x 30 días/mes

En este caso, para el generador seleccionado, el consumo es de 48 litros/hora

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL-SISTEMA DE GENERACIÓN-MES					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Generador Diesel	Generador Diesel 200kVA	1	un.	USD 20.000,00	USD 20.000,00
	Combustible Diesel-Punta	8640	litros	USD 1,00	USD 8.640,00
	Combustible Diesel-Valle	8640	litros	USD 1,00	USD 8.640,00
	Combustible Diesel-Resto	17280	litros	USD 1,00	USD 17.280,00

Tabla 14 Tabla Costos del Sistema de Generación Diesel

PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA-SISTEMA DE GENERACION					
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Generador Diesel	Instalación Llave en mano Generador	1	un.	\$ 870.000,00	\$ 870.000,00
TOTAL					\$ 870.000,00

Tabla 15 Tabla Costos de Mano de Obra Sistema de Generación Diesel

Como ingreso, se toma el ahorro que generaría suministrar a la planta desde algún Sistema de Conexión:

AHORRO ENERGETICO SEGÚN ESCENARIO DE CONSUMO POR MES					
Punta	Costo de la energía en Punta	17112,5	Kw.h	USD 0,020	USD 342,25
Valle	Costo de la energía en Valle	21277,5	Kw.h	USD 0,018	USD 383,00
Resto	Costo de la energía en Resto	44972,5	Kw.h	USD 0,019	USD 854,48

Tabla 16 Tabla Ahorro energético

5.2 Variables Económicas

- TMAR

La Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) es un que es calculado por el inversor del proyecto.

Esta tasa se usa como referencia para determinar si el proyecto puede generar ganancias o no. Si el proyecto no tiene una tasa de rendimiento superior a la TMAR, no debe ser aprobado, porque no cumple las expectativas de ganancias al inversor, o directamente no genera ganancias.

Esa tasa es la suma de la tasa de inflación y el riesgo de la inversión, o el costo de oportunidad de invertir nuestro dinero en otro proyecto.

La inflación del dólar está sujeta a la tasa de interés de la Reserva Federal de EEUU la cuál es del 3,6%. A esta tasa se la considera sin riesgo.

Por ello es que hay que sumarle una tasa asociada al riesgo de inversión.

Podemos clasificar tres tipos de riesgo dependiendo la situación actual de cada país:

- Riesgo bajo: Entre 3% y 6%
- Riesgo moderado: Entre 6% y 10%
- Riesgo alto: Mayor a 10%

Por la situación actual del país, con una alta inflación que produce una fluctuación grande en los precios, se adopta un riesgo alto, con un valor de 15%.

$$TMAR = Tasa\ de\ Inflación + Tasa\ de\ Riesgo$$

$$TMAR = 3,5\% + 15\% = 18,5\%$$

- VAN

El Valor Actual Neto (VAN), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado numero de flujos de caja de futuros, originados por una inversión. Este método consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros o en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos efectivos futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial.

Para actualizar estos flujos netos de cajas se utiliza la tasa de descuento calculada previamente (TMAR).

La ecuación para calcular el VAN es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

- V_t representa los flujos de cada año.
- I_0 es el valor de la inversión inicial.
- n es el número de años considerados.
- k es el valor de TMAR.
- t es el año evaluado.

Hay tres valores posibles para el VAN, cuyo significado es el siguiente:

Valor	Significado	Decisión a tomar
$VAN > 0$	La inversión producirá ganancias por encima de la rentabilidad exigida (TMAR)	El proyecto debe aceptarse
$VAN < 0$	La inversión producirá ganancias por debajo de la rentabilidad exigida (TMAR) o producirá pérdidas.	El proyecto debe rechazarse
$VAN = 0$	La inversión no producirá ganancias ni pérdidas.	Como el proyecto no agrega valor monetario por encima de la rentabilidad exigida, la decisión debería basarse en otros criterios, por ejemplo posible aumento de la energía eléctrica

Tabla 17 Análisis del VAN

5.3 Evaluación del proyecto

Para la evaluación final del proyecto, se plantean tres escenarios: la inversión del sistema de conexión, la inversión del sistema de conexión y generación solar, y la inversión del sistema de conexión y generación diesel.

Para cada uno de estos escenarios se calculará el VAN aplicando como tasa de descuento el TMAR calculado anteriormente.

- Sistema de Conexión

Para este caso, se evalúa a la generación como algo existente y sin valor, y solo se toma en cuenta el gasto de inversión del sistema de conexión. El período de análisis es de 15 años.

Se analizará cuantas horas habría que generar para que el proyecto sea rentable, partiendo como base el escenario "Resto".

Resto:

Flujo de Cajas- Sistema de Conexión			
Periodo	Egresos	Ingresos	Flujo
0	\$ 8.800.000,00	\$ -	-\$ 8.800.000,00
1	-	\$ 1.486.790,85	-\$ 7.313.209,15
2	-	\$ 1.486.790,85	-\$ 5.826.418,30
3	-	\$ 1.486.790,85	-\$ 4.339.627,45
4	-	\$ 1.486.790,85	-\$ 2.852.836,60
5	-	\$ 1.486.790,85	-\$ 1.366.045,75
6	-	\$ 1.486.790,85	\$ 120.745,10
7	-	\$ 1.486.790,85	\$ 1.607.535,95
8	-	\$ 1.486.790,85	\$ 3.094.326,80
9	-	\$ 1.486.790,85	\$ 4.581.117,65
10	-	\$ 1.486.790,85	\$ 6.067.908,50
11	-	\$ 1.486.790,85	\$ 7.554.699,35
12	-	\$ 1.486.790,85	\$ 9.041.490,20
13	-	\$ 1.486.790,85	\$ 10.528.281,05
14	-	\$ 1.486.790,85	\$ 12.015.071,90
15	-	\$ 1.486.790,85	\$ 13.501.862,75
TIR	-	-	14,75%
VAN	-	-	\$ 1.393.238,08

Tabla 18 Flujo de Cajas- Sistema de Conexión

Generando en este escenario, los resultados arrojan que no es rentable colocar un sistema de conexión para generar solamente esas horas. Por lo tanto, para que sea rentable es necesario tener generación durante más

tiempo.

Se realiza un análisis de sensibilidad con respecto a las horas de generación:

	Resto+0,6 hs en Valle	Resto+1,2 hs de Valle	Resto+1,8 hs de Valle	Resto+2,4hs de Valle	Resto+3 hs de Valle
TIR	15,63%	16,50%	17,36%	18%	19,05%
VAN	-\$ 1.072.699,07	-\$ 752.160,06	-\$ 431.621,05	-\$ 111.082,04	\$ 209.456,97

Tabla 19 Análisis de Sensibilidad según horas de generación

Y se puede ver que a partir de generar tres horas en Valle, además de Resto, el proyecto comienza a ser rentable.

- **Sistema de Conexión y Generación Solar**

Para este caso, se agrega al análisis anterior el costo de instalar los paneles solares necesarios para generar lo que necesita la Planta. Como ingreso, se tomará que el sistema de generación solar estará aportando en promedio 6 horas en el escenario Valle.

El período de análisis para este caso es de 25 años, teniendo en cuenta que la inversión inicial es mucho mayor que en el caso anterior.

Flujo de Cajas-Sistema de Conexión			
Periodo	Egresos	Ingresos	Flujo
0	-\$ 54.059.480,00	\$ -	-\$ 54.059.480,00
1	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
2	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
3	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
4	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
5	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
6	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
7	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
8	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
9	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
10	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
11	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
12	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
13	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
14	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
15	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
16	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
17	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
18	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
19	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
20	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
21	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
22	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
23	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
24	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
25	\$ -	\$ 743.395,43	\$ 743.395,43
TIR		-7%	
VAN	-\$ 50.098.814,87		

Tabla 20 Flujo de Cajas-Sistema de Conexión y Generación Solar

Para el caso de generación solar, se puede observar que tanto el TIR como el VAN arrojan resultados negativos en un plazo de 25 años, por lo que en estos momentos no es rentable dicha instalación.

- **Sistema de Conexión y Generación Diesel**

Para este caso, no se realizará el análisis de VAN y TIR, debido a que se puede observar fácilmente en las tablas en la sección Estudio de Costos que el ahorro de generar con un generador diesel, es menor al gasto de combustible del mismo.

Ahorro de energía mensual: \$229.056,76 (entre los tres escenarios de consumo)

Gasto de combustible mensual: \$5.011.200,00 (entre los tres escenarios de consumo)

Por lo tanto, en estos momentos no es rentable generar a través de generador diesel.

Capítulo 6

6.1 Conclusiones

Se presenta la utilización y aplicación práctica del uso del transformador de tres devanados para adoptarlo en el sistema eléctrico principal de la planta Química Del Valle SRL.

Esta solución no ha sido aplicada en la planta en la actualidad, y la conclusión luego de realizar el PIP es la siguiente:

A fines teóricos se demostró que es posible instalar el transformador de tres devanados para amortiguar y separar distintos fallos de la red, y para realizar un aporte a la carga del sistema de generación.

Actualmente los dispositivos de protección son fiables, y existe una electrónica avanzada para poder realizar un sistema de generación paralelo de manera más económica y simple.

También, el sistema de generación como se explicó en el apartado de puesta a tierra, no sería posible en caso de regularizar el Pilar de Medición de la planta, ya que el Interruptor Diferencial actuaría cuando el generador entre en marcha.

En el capítulo 5, se realizó el análisis económico donde los resultados arrojan que instalar el sistema de conexión es rentable generando como mínimo 15 horas diarias. Esto podría darse generando con un generador a hidrogeno, o un generador diesel, debido a que con paneles solares no es posible, ya que el promedio diario de sol es menor.

Con generador diesel se demostró que no es rentable porque el costo del combustible es mayor al ahorro que se obtendría generando con este generador.

Por lo tanto, sólo se podría tomar en cuenta el proyecto en caso de que se avance con la generación con el hidrogeno que actualmente la Planta libera al ambiente.

El transformador de tres devanados sería útil en el caso de la Planta empiece a consumir en Media Tensión con la posibilidad de realizar un acuerdo para generar en BT y aportar a la Red.

Una solución posible es generar a través de paneles solares con un regulador de tensión e inyectar directamente la energía en corriente continua a las barras de entrada a las celdas.

Otra solución para disminuir los costos podría ser la de generar con paneles solares para los servicios auxiliares de la planta (bombas, motores, iluminación, etc).

Anexos.

1. Transformadores multicircuitos

1.1 Teoría general de los transformadores multicircuitos

La figura 19 muestra esquemáticamente un transformador de n devanados, todos ellos situados sobre un mismo núcleo magnético. Este circuito puede representar o un transformador monofásico o una fase de transformador trifásico.

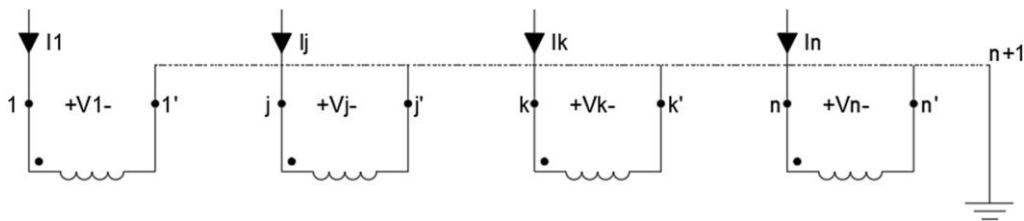


Figura 19 Esquema de circuito de un transformador de n circuitos

El transformador puede analizarse como un circuito de $n+1$ mallas con $n+1$ terminales, o como circuito de $n+1$ nodos, n de los cuales son independientes.

A pesar de las características magnéticas no lineales del hierro, se ha demostrado que a menudo puede analizarse un transformador de dos devanados considerándolo como un circuito lineal, y lo mismo ocurre con los transformadores multicircuito. Las características magnéticas no lineales del núcleo afectan solamente a los fenómenos de excitación, pero como la corriente de excitación tiene una intensidad que es solo un pequeño tanto por ciento de las intensidades nominales de los circuitos, suele ser suficientemente aproximado suponer sinusoidal la corriente de excitación correspondiente a un flujo sinusoidal. Por lo tanto, para analizar transformadores multicircuito puede tomarse como base de la teoría de los circuitos acoplados lineales.

1.1.1 Ecuaciones para las tensiones en las mallas

Un transformador de n circuitos puede analizarse como un circuito de n mallas, estando cada una de ellas acopladas electromagnéticamente con las demás. Así, pues, las ecuaciones vectoriales para las tensiones en un estado permanente pueden escribirse de la siguiente manera:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1j}I_j + Z_{1k}I_k + \dots + Z_{1n}I_n \quad (1)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2j}I_j + Z_{2k}I_k + \dots + Z_{2n}I_n \quad (2)$$

$$V_j = Z_{j1}I_1 + Z_{j2}I_2 + \dots + Z_{jj}I_j + Z_{jk}I_k + \dots + Z_{jn}I_n \quad (3)$$

$$V_n = Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_2 + \dots + Z_{nj}I_j + Z_{nk}I_k + \dots + Z_{nn}I_n \quad (4)$$

en donde las V son los vectores representativos de las tensiones terminales de los devanados, las I son los vectores representativos de las corrientes que por ellos circulan y las Z son sus impedancias complejas de autoinducción e inducción mutua. En la figura 1 se indican los sentidos positivos de corrientes y tensiones, colocándose un punto en los terminales de igual polaridad relativa. Los significados de las impedancias pueden explicarse por medio de una ecuación. Por ejemplo, en la ecuación (3), Z_{jj} es la autoimpedancia compleja del circuito j , y Z_{jk} es la impedancia mutua compleja entre los circuitos j y k . Así:

$$Z_{jj} = R_j + X_{jj} \quad (5)$$

donde R_j es la resistencia efectiva y X_{jj} es la reactancia autoinductiva del devanado. Si se desprecia la pérdida en el núcleo, las componentes resistivas de las impedancias mutuas son nulas y, para los sentidos tomados como positivos para corrientes y tensiones en la figura 1, las reactancias mutuas son positivas; es decir:

$$Z_{jk} = Z_{kj} \quad (6)$$

Teóricamente, el comportamiento de un transformador de n circuitos puede calcularse, para cualesquiera condiciones de funcionamiento especificadas, si se conocen los valores complejos de los coeficientes de impedancia de las ecuaciones (1-4) a partir de medidas o de cálculos basados en las dimensiones. Obsérvese el carácter de circuito abierto de los coeficientes de impedancia de esas ecuaciones. Así, la autoimpedancia de un circuito cualquiera es igual a su impedancia con todos los demás circuitos abiertos, y la impedancia mutua entre dos circuitos cualesquiera, o sea, Z_{jk} , es igual al cociente complejo entre la tensión en circuito abierto creada en el circuito j y la intensidad de la corriente que circula por el circuito k , estando abiertos todos los circuitos menos el k . Por lo tanto, las impedancias de las ecuaciones (1-4) podrán determinarse experimentalmente por medio de un cierto número de ensayos a circuito abierto.

Sin embargo, se obtendrían resultados pocos precisos si se calculara el funcionamiento de un transformador multicircuito sustituyendo las ecuaciones (1-4) los valores medidos de las impedancias propias y mutuas. Las caídas de tensión en el transformador dependen principalmente de las fugas magnéticas- es decir, de diferencias relativamente pequeñas entre las distintas impedancias propias y mutuas- y para determinar estas pequeñas diferencias con precisión razonable, deberían haberse medido las impedancias mutuas y propias con una precisión muy elevada. Esta medida resultaría muy difícil a

causa de las características magnéticas no lineales del núcleo. Por tanto, aun cuando las ecuaciones son importantes como punto de partida para el análisis de los transformadores multicircuito, es preciso manejarlas en otras formas antes de poderlas utilizar en cálculos numéricos.

1.1.2 Admitancias de entrada y de transferencia en cortocircuito

Aplicando la regla de Cramer a las ecuaciones (1-4), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$I_1 = \frac{M_{11}}{D_z} V_1 + \frac{M_{21}}{D_z} V_2 + \dots + \frac{M_{j1}}{D_z} V_j + \frac{M_{k1}}{D_z} V_k + \dots + \frac{M_{n1}}{D_z} V_n \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{M_{12}}{D_z} V_1 + \frac{M_{22}}{D_z} V_2 + \dots + \frac{M_{j2}}{D_z} V_j + \frac{M_{k2}}{D_z} V_k + \dots + \frac{M_{n2}}{D_z} V_n \quad (9)$$

$$I_j = \frac{M_{1j}}{D_z} V_1 + \frac{M_{2j}}{D_z} V_2 + \dots + \frac{M_{jj}}{D_z} V_j + \frac{M_{kj}}{D_z} V_k + \dots + \frac{M_{nj}}{D_z} V_n \quad (10)$$

$$I_n = \frac{M_{1n}}{D_z} V_1 + \frac{M_{2n}}{D_z} V_2 + \dots + \frac{M_{jn}}{D_z} V_j + \frac{M_{kn}}{D_z} V_k + \dots + \frac{M_{nn}}{D_z} V_n \quad (11)$$

donde D_z es el determinante de las Z en las ecuaciones (1-4), y M_{jk} es el adjunto del elemento de la fila j y la columna k . A causa de la simetría de las ecuaciones (1-4),

$$M_{jk} = M_{kj} \quad (12)$$

Cada uno de los términos de los segundos miembros de las ecuaciones (8-11) es una componente de una de las corrientes creadas por una de las tensiones entre terminales actuando sola, siendo nulas todas las tensiones entre terminales restantes. Por tanto, el coeficiente de cada término en V podrá representarse como una admitancia. En general,

$$Y_{jk} = \frac{M_{kj}}{D_z} \quad (13)$$

Es el vector representativo de la corriente que circula por el circuito j creada por una tensión V_k unitaria aplicada al circuito k cuando todas las restantes tensiones terminales entre terminales son nulas- es decir, están cortocircuitados dichos pares terminales.

La admitancia y_{jk} recibe el nombre de la *admitancia de transferencia en cortocircuito*

entre los circuitos j y k , y de la ecuación (12) resulta evidente que:

$$y_{jk}=y_{kj} \quad (14)$$

Cuando tensión y corriente pertenecen al mismo circuito, con lo que la admitancia tiene la forma,

$$y_{jj} = \frac{M_{jj}}{D_z} \quad (15)$$

la admitancia recibe el nombre de *admitancia de entrada en cortocircuito* del circuito j, ya que es la intensidad que circula por el circuito j por unidad de tensión aplicada al mismo circuito cuando todas las demás están en cortocircuitos. Escribiendo las ecuaciones 8-11 en función de las admitancias de entrada y de transferencia en cortocircuito, resulta,

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12} V_2 + \dots + y_{1j}V_j + y_{1k} V_k + \dots + y_{1n} V_n \quad (16)$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22} V_2 + \dots + y_{2j}V_j + y_{2k} V_k + \dots + y_{2n} V_n \quad (17)$$

$$I_j = y_{j1}V_1 + y_{j2} V_2 + \dots + y_{jj}V_j + y_{jk} V_k + \dots + y_{jn} V_n \quad (18)$$

$$I_n = y_{n1}V_1 + y_{n2} V_2 + \dots + y_{nj}V_j + y_{nk} V_k + \dots + y_{nn} V_n \quad (19)$$

Según se verá a continuación, estas ecuaciones son adecuadas para fines de cálculo, ya que las admitancias en cortocircuitos de las ecuaciones (16-19) pueden medirse o calcularse a partir de las dimensiones fácilmente y están relacionadas directamente con las características de impedancia de fuga del transformador.

1.1.3. Ecuaciones para las corrientes en los nodos.

En las secciones anteriores de este capítulo se han tomado las ecuaciones (1-4), para las tensiones de las mallas como punta de partida para el análisis del transformador de n circuitos. La solución de dichas ecuaciones da las ecuaciones (16-19), mas útiles relativas a las corrientes en las mallas.

De otra manera, las ecuaciones para las corrientes pueden obtenerse directamente si se escriben las ecuaciones para las corrientes en los nodos del circuito de la figura 1,

tomando como nodo de referencia los terminales puestos a tierra 1',2',.....,n'. Asi, entonces:

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12} V_2 + \dots + Y_{1j}V_j + Y_{1k} V_k + \dots + Y_{1n} V_n \quad (20)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22} V_2 + \dots + Y_{2j}V_j + Y_{2k} V_k + \dots + Y_{2n} V_n \quad (21)$$

$$I_j = Y_{j1}V_1 + Y_{j2} V_2 + \dots + Y_{jj}V_j + Y_{jk} V_k + \dots + Y_{jn} V_n \quad (22)$$

$$I_n = Y_{n1}V_1 + Y_{n2} V_2 + \dots + Y_{nj}V_j + Y_{nk} V_k + \dots + Y_{nn} V_n \quad (23)$$

En estas ecuaciones, las I son los vectores representativos de las corrientes que penetran por los terminales libres, siendo las V los vectores representativos de los potenciales de dichos terminales respecto al nodo de tierra de referencia, y las Y son las admitancias complejas propias y mutuas de los nodos. Por ejemplo, Y_{jj} es la autoadmitancia del nodo j y es igual al vector representativo de la corriente que circula por el terminal j por unidad de tensión aplicada al terminal j, estando todos los terminales conectados a tierra- es decir, cortocircuitados.

Análogamente Y_{jk} es la admitancia mutua de los nudos j y k, y es igual al vector representativo de la corriente que circula por el terminal j por unidad de tensión aplicada al terminal k, estando puestos a tierra, es decir, cortocircuitados, todos los terminales menos el k. Como en las redes lineales,

$$Y_{jk} = Y_{kj} \quad (24)$$

Como las admitancias en cortocircuito dependen principalmente de las fugas magnéticas, y como éstas son la causa principal de las caídas de tensión en un transformador, los coeficientes de las ecuaciones (20-23), están relacionadas directamente con la importancia de los factores que influyen sobre los efectos del transformador como elemento de impedancia en los circuitos a los que está conectado. Además, las admitancias en cortocircuito pueden calcularse fácilmente a partir de la disposición geométrica de los devanados, o medirse por medio de ensayos. Por tanto, las ecuaciones (20-23) tienen una forma conveniente para el análisis de los transformadores multicircuitos.

1.1.4 Medida de las admitancias

Los valores de los coeficientes de admitancia de las ecuaciones (20-23) y de las admitancias de las ramas del circuito equivalente pueden determinarse experimentalmente mediante un cierto número de ensayos en los que se aplica a cada devanado una tensión baja estando cortocircuitados todos los demás. La tensión aplicada y, las corrientes que circulan por todos los devanados se miden vectorialmente-

es decir, se miden sus valores eficaces con instrumentos ordinarios de corriente alterna y sus defasajes se determinan por los métodos a analizar en la sección.

Como las admitancias en cortocircuito están determinadas principalmente por las fugas magnéticas, sus valores estarán muy poco afectados por las características magnéticas no lineales del núcleo, y por tanto los valores de estas admitancias, determinados por ensayos en cortocircuito a tensión reducida, son casi iguales a sus valores para tensiones normales.

Si se excita el circuito k con todos los demás cortocircuitados, la admitancia compleja de entrada en cortocircuito Y_{kk} del circuito k es:

$$Y_{kk} = Y_{kk} (\theta_{kk} = G_{kk} + j B_{kk} = \frac{I_{k(k)}}{V_k} \quad (25)$$

Donde:

- V_k es la tensión vectorial aplicada al circuito k,
- $I_{k(k)}$ es la corriente vectorial que circula por el circuito k,
- G_{kk} es la conductancia de entrada en cortocircuito,
- B_{kk} es la susceptancia de entrada en cortocircuito,
- θ_{kk} es el desfase de $I_{k(k)}$ respecto a V_k .

Las conductancias de entrada en cortocircuito de todos los circuitos son cantidades positivas, ya que se absorbe potencia en el devanado excitado. Así, si es P_{kk} la indicación de un vatímetro conectado para señalar la potencia entregada al devanado excitado k,

$$G_{kk} = + \frac{P_{kk}}{V_k^2} \quad (26)$$

Las susceptancias de entrada en cortocircuito de todos los circuitos son cantidades negativas, ya que la corriente que circula por el devanado excitado está retrasada respecto a la tensión aplicada, como ocurre en todo circuito inductivo. Por tanto,

$$B_{kk} = - \sqrt{\left(\frac{I_{k(k)}}{V_k}\right)^2 - G_{kk}^2} \quad (27)$$

Las admitancias de transferencia en cortocircuito y de enlace, pueden determinarse a partir de medidas de las intensidades eficaces y ángulos de fase de las corrientes que circulan por los devanados cortocircuitados. Así, si se excita el devanado k y se cortocircuitan todos los demás devanados, el valor complejo Y_{jk} de la admitancia de transferencia en cortocircuito entre los circuitos j y k es:

$$Y_{kk} = Y_{jk} (\theta_{jk} = G_{jk} + j B_{jk} = \frac{I_{j(k)}}{V_k} \quad (28)$$

Donde:

- V_k es la tensión (vectorial) aplicada al circuito k,
- $I_{j(k)}$ es la intensidad (vectorial) de la corriente que circula por el circuito j
- G_{jk} es la conductancia de transferencia en cortocircuito
- B_{jk} es la susceptancia de transferencia en cortocircuito
- θ_{jk} es el desfase de $I_{j(k)}$ respecto a V_k

Se puede determinar la magnitud de cada admitancia y susceptancia mutua empleando vatímetros conectados adecuadamente. Así, si es P_{jk} la indicación de un vatímetro cuyo devanado de intensidad está conectado en serie con el devanado j cortocircuitado y cuyo devanado de tensión está en paralelo con la tensión V_k aplicada al devanado excitado k

$$G_{jk} = \pm \frac{P_{jk}}{V_k^2} \quad (29)$$

El signo de la conductancia mutua se puede determinar si se comparan las polaridades de las conexiones del vatímetro para desviación positiva con sus polaridades.

1.2 Transformador de tres circuitos

El transformador a utilizar en la planta es un transformador de tres circuitos o devanados, un primario, un secundario y un terciario.

El transformador monofásico de tres circuitos puede analizarse por medio de la teoría general de los transformadores monofásicos de n circuitos desarrollada en los apartados anteriores de este capítulo, teoría que puede aplicarse sobre una base por fase al análisis de problemas trifásicos. El transformador de tres circuitos puede tratarse también por métodos no aplicables a los casos en que intervienen más de tres circuitos independientes. Se analizarán a continuación, ambos métodos de análisis.

1.2.1 A partir de la teoría del transformador multicircuito.

Según la teoría general de los transformadores de n circuitos, el transformador de tres circuitos puede representarse por un circuito equivalente de cuatro terminales con un enlace entre cada terminal y cada uno de los demás. Esto presupone que pueden considerarse conectados tres terminales de la misma polaridad relativa. Así, el circuito de cuatro terminales y seis ramas de la figura 20a. será un circuito equivalente exacto del transformador de tres circuitos. Los circuitos exteriores se conectan entre los terminales 1,2,3 y el terminal común 0. Este circuito puede representar o un transformador monofásico de tres circuitos en un circuito monofásico, o una fase de un banco trifásico de transformadores de tres circuitos.

Según se vio en el estudio de transformadores de n circuitos, los enlaces del circuito equivalente que terminan en el terminal común 0 representan a las características de excitación del transformador y, como la corriente de excitación suele ser débil, las admitancias de estos enlaces suelen ser pequeñas. Por tanto, casi siempre se suprimirán y el circuito equivalente se reduce entonces al montaje simple en triángulo de la figura 20b.

Como todo montaje en triángulo de elementos de circuitos lineales puede siempre sustituirse por un montaje equivalente en estrella, el circuito equivalente en triángulo de la figura 20b podrá sustituirse por el circuito en estrella de la figura 20c. De acuerdo con las conocidas fórmulas de transformación de triángulo a estrella, las relaciones entre las impedancias Z_1, Z_2, Z_3 del circuito equivalente conectado en estrella (figura 20c) y las admitancias Y_{12}, Y_{23}, Y_{31} de los enlaces del circuito equivalente en triángulo (fig 20b) son:

$$Z_1 = \frac{F_{23}}{F_{12}F_{23} + F_{23}F_{31} + F_{31}F_{12}} \quad (31)$$

$$Z_2 = \frac{F_{31}}{F_{12}F_{23} + F_{23}F_{31} + F_{31}F_{12}} \quad (32)$$

$$Z_3 = \frac{F_{12}}{F_{12}F_{23} + F_{23}F_{31} + F_{31}F_{12}} \quad (33)$$

Así pues, un transformador de tres circuitos podrá representarse por un circuito equivalente simple que comprenda tres impedancias en serie con los tres circuitos exteriores, como en el montaje de estrella en figura 20c.

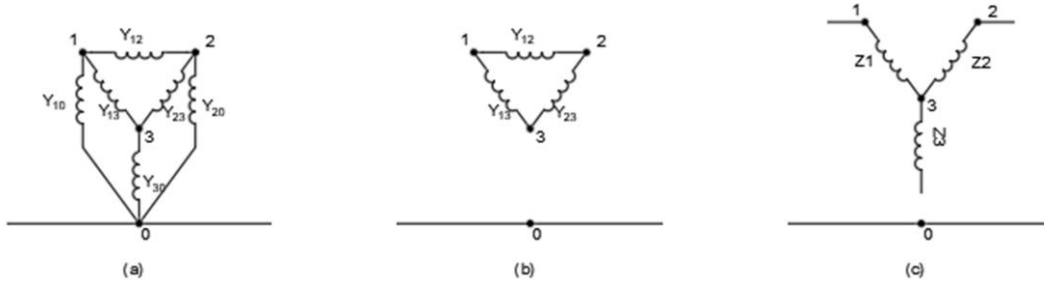
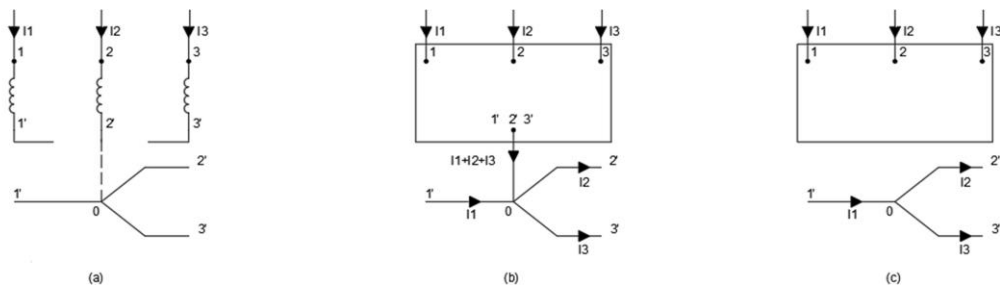


Figura 20 Circuitos equivalentes para transformadores de tres circuitos. El circuito equivalente exacto a), se reduce a los aproximados b) y c), al despreciar la corriente de excitación

1.2.2 El transformador de tres circuitos como red de tres terminales.

Los circuitos equivalentes simples de tres terminales que representan a un transformador de tres circuitos pueden, también, deducirse sin el auxilio de la teoría de los n circuitos. Consideremos el transformador de tres circuitos de la figura 7a. A los terminales 11', 22', 33' se conectan los circuitos exteriores. A las frecuencias de los sistemas potencia, las corrientes a través de las capacidades de los devanados son despreciables, por lo que las condiciones del circuito quedarán inalteradas si se consideran conectados los terminales 1', 2' y 3', formando un terminal común 0, según indican las conexiones en líneas de trazos de la figura 21a. Los circuitos exteriores pueden, entonces, considerarse conectados entre los terminales libres 1, 2 y 3 y el terminal común 0. Así pues, el transformador de tres circuitos es equivalente a un elemento de circuito que tenga cuatro terminales accesibles o puntos de entrada, según se indica en la caja rectangular de la figura 21b.

Sean I_1, I_2, I_3 los vectores representativos de las corrientes que penetran por los tres terminales de polaridad correspondiente, según se indican los puntos de polaridad y las flechas en la figura 21a. Estas corrientes son, también, las que penetran por los terminales 1, 2 y 3 de la figura 21b y por tanto la corriente que sale de la caja rectangular por el terminal común 1'2'3' debe ser igual a la suma vectorial $I_1 + I_2 + I_3$ de las corrientes que penetran por los terminales libres, según se indica en la figura 21b.



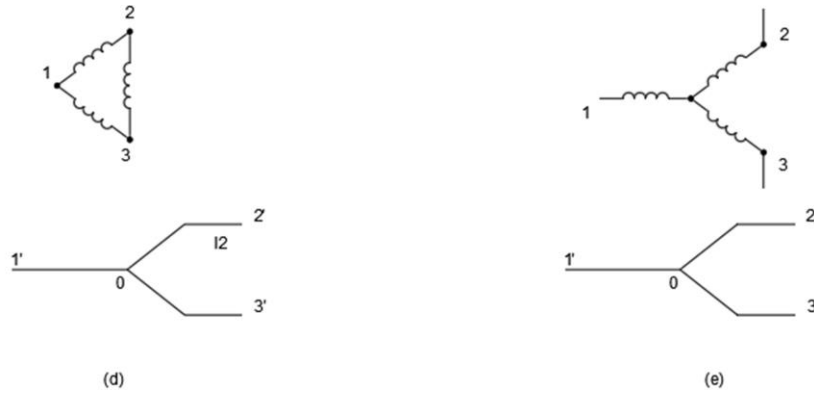


Figura 21 Esquema de transformador de tres circuitos a), y pasos sucesivos en la deducción de los circuitos equivalentes aproximados d) y e).

Como la corriente de excitación suele ser muy débil, casi siempre se desprecia; es decir, la fuerza magnetomotriz resultante de todas las corrientes se supone nula casi siempre. Así pues, si se toman los sentidos positivos de las corrientes en el mismo sentido respecto al núcleo, como indican las flechas y puntos de polaridad en la figura 21a, y si se refirieron todas las corrientes a una base común, su suma vectorial es nula, o sea,

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (34)$$

En esta hipótesis, pues, no circula corriente alguna por la conexión entre el terminal común 1'2'3' y el punto de unión 0 de los circuitos exteriores. Por tanto, cuando se refieren todas las corrientes a una base común, puede suprimirse el terminal 1'2'3' y el transformador de tres circuitos es equivalente al elemento de circuito de tres terminales indicado por la caja de la figura 21c.

Exceptuando los fenómenos de excitación, el transformador con núcleo de hierro se comporta como elemento de circuito esencialmente lineal, y por tanto la red de tres terminales interior a la caja de la figura 21c es una red de impedancias esencialmente lineales. Por lo que respecta a sus características exteriores, toda red que tenga tres terminales accesibles o puntos de entrada es equivalente a un triángulo o una estrella de impedancias.

Por lo tanto, cuando se desprecia la corriente de excitación y se refieren todas las corrientes y tensiones a una base común, el transformador de tres circuitos podrá representarse o por un circuito equivalente a la figura (fig. 21d), o por una estrella (fig. 21e). Corrientemente, es más útil el circuito equivalente en estrella, ya que las impedancias que representan al transformador pueden entonces combinarse en serie con las impedancias de circuitos exteriores

1.2.3 Determinación de los parámetros del circuito equivalente

El circuito equivalente por mallas de un transformador de n circuitos se reduce, para un transformador de tres circuitos, al triángulo de la figura 19b; es decir, el triángulo no es más que un caso particular de la teoría del transformador de n circuitos. Las admitancias de enlace del circuito equivalente en triángulo podrán, pues, determinarse por los mismos métodos que se aplican, en general, a los transformadores de n circuitos. Sus valores, pues, podrán determinarse experimentalmente mediante ensayos en cortocircuito en los que vaya aplicándose una tensión reducida a los devanados, uno por uno, estando los otros dos cortocircuitados.

No obstante, para determinar las impedancias del circuito equivalente en estrella resulta más sencillo evaluarlas en función de las impedancias en cortocircuito o equivalentes de cada par de devanados actuando como transformador de dos circuitos. La impedancia equivalente de cada par de devanados puede calcularse mediante fórmulas de diseño conocidas para dos circuitos, o pueden determinarse experimentalmente por medio de tres simples ensayos en cortocircuito que se describirán a continuación.

Por ejemplo, supongamos aplicada una baja tensión al devanado 1 estando cortocircuitado el 2 y en circuito abierto el 3, como en la figura 22a. En estas condiciones, el circuito equivalente de la figura 7e se reduce al de la figura 22b. Sean V_1 , I_1 y P_1 los valores medidos de la tensión, intensidad y potencia suministradas al devanado 1. Entonces, el módulo de la impedancia equivalente o en cortocircuito $Z_{(12)}$ de los devanados 1 y 2 es:

$$Z_{(12)} = \frac{V_1}{I_1} \quad (35)$$

Los subíndices asociados a la impedancia equivalente y a sus componentes de resistencia y reactancia están encerrados entre paréntesis para indicar que los dos devanados designados actúan como un par. El orden de los subíndices es indiferente. Así pues, si se refieren a una base común las corrientes y tensiones, prescindiendo de los efectos de la débil corriente de excitación de cortocircuito, se obtendría el mismo valor de la impedancia equivalente si se excitara el devanado 2 y se cortocircuitara el 1.

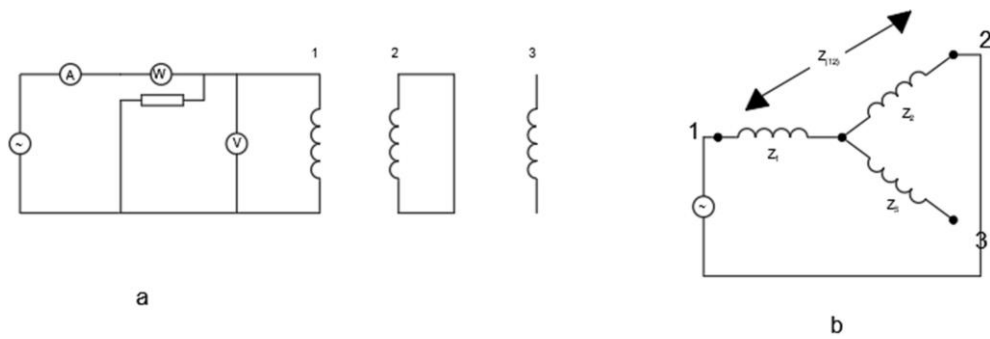


Figura 22 Ensayo en cortocircuito para medir las impedancias equivalentes, a) esquema de circuito y b) circuito equivalente correspondiente

Examinando la figura 8b se ve que con el devanado 1 excitado y el 2 en cortocircuito, la impedancia en cortocircuito $Z_{(12)}$ es la combinación serie de las dos impedancias de rama Z_1 y Z_2 del circuito equivalente en estrella. Por lo tanto,

$$Z_{(12)} = Z_1 + Z_2 \quad (38)$$

Análogamente, las relaciones entre las impedancias en cortocircuito $Z_{(23)}$ y $Z_{(13)}$ y las impedancias Z_1, Z_2, Z_3 del circuito equivalente son:

$$Z_{(23)} = Z_2 + Z_3 \quad (39)$$

$$Z_{(31)} = Z_3 + Z_1 \quad (40)$$

De las ecuaciones (38), (39) y (40) pueden despejarse las impedancias Z_1, Z_2, Z_3 de las ramas del circuito equivalente en estrella en función de las impedancias en cortocircuito $Z_{(12)}, Z_{(23)}, Z_{(31)}$ obteniéndose las siguientes expresiones:

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{(12)} + Z_{(31)} - Z_{(23)}) \quad (41)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{(12)} + Z_{(23)} - Z_{(31)}) \quad (42)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{(31)} + Z_{(23)} - Z_{(12)}) \quad (43)$$

Obsérvese la forma de estas expresiones; por ejemplo, la impedancia que representa el circuito 1 en el circuito equivalente en estrella de la figura 7e es igual a la mitad de la siguiente cantidad: suma vectorial de las dos impedancias equivalentes del circuito 1

tomado con cada uno de los otros dos circuitos, menos (vectorialmente) la impedancia de los circuitos 2 y 3.

Así pues, las tres impedancias del circuito equivalente en estrella pueden determinarse a partir de los valores medidos o calculados de las tres impedancias equivalentes o en cortocircuito de cada par de devanados actuando como transformador de dos circuitos.

2. Folletos

Bibliografía.

- [1] Circuitos magnéticos y Transformadores- E.E.Staff-M.I.T.
- [2] Normas IRAM- AADL J2022-2- IRAM- AADL J2006 .
- [3] AEA 90364- Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles (Edición 2006)
- [4] Energía fotovoltaica, Resultados preliminares de un relevamiento de instalaciones fotovoltaica en Argentina.
- [5] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Energía renovables para todos, Energía renovables.
- [6] Renovables Generación Eléctrica Distribuida.
- [7] Catálogos y folletos.
- [8] <https://illustrationprize.com/es/681-three-winding-transformer.html>
- [9] <https://ingtelecto.com/transformadores-de-multiples-bobinas/>
- [10] Tesis de Grado de Marcelo Mikuljan