

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Reemplazo de Generadores Diésel por Energía Eléctrica en Vaca Muerta

Autor/es

Nombres y Apellidos: Julen Ramos Velasco

DNI: 42782328 Nro. Legajo Alumno: 14249

Mail de contacto: julenr4@gmail.com

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Nombres y Apellidos: Joaquín Mellinas

DNI: 42492024 Nro. Legajo Alumno: 14367

Mail de contacto: joaquinmellinas@gmail.com

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Director/es del Proyecto

Director: Ing. Ruben Ferreyra

Codirector: Ing. Rubén Zuanetti

Mar del Plata, 9 de diciembre de 2025



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

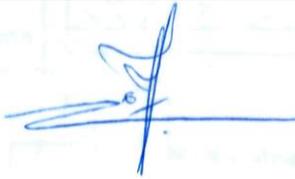
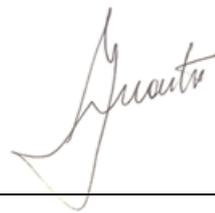
ANEXO II

Autorización Repositorio Institucional RINFI

Facultad de Ingeniería - UNMDP

En calidad de TITULARES de los derechos de autor de la obra que se detalla a continuación, y sin infringir según mi conocimiento derechos de terceros, por la presente informo a la Facultad de Ingeniería de la UNMDP mi decisión de concederle en forma gratuita, no exclusiva y por tiempo ilimitado la autorización para:

- Publicar el texto del trabajo más abajo indicado, exclusivamente en medio digital, en el sitio web de la Facultad y/o Universidad, por Internet, a título de divulgación gratuita de la producción científica generada por la Facultad, a partir de la fecha especificada.
- Permitir a la Biblioteca que, sin producir cambios en el contenido, establezca los formatos de publicación en la web para su más adecuada visualización y la realización de copias digitales y migraciones de formato necesarias para la seguridad, resguardo y preservación a largo plazo de la presente obra:

Autor 1: Joaquín Mellinas Documento: 42492024 Teléfono: 2235818499 E-mail: joaquinmellinas@gmail.com	
Autor 2: Julen Ramos Velasco Documento: 42782328 Teléfono: 2236320243 E-mail: julenr4@gmail.com	
Director/a: Ruben Osvaldo Ferreyra Documento: 11.490.901 Leg. 5758	
Codirector/a: Rubén Adrián Zuanetti Documento: 18.127.018 Leg. 10389	

2. Título obtenido:

3. Identificación/Título de la Obra:



4. AUTORIZO la publicación bajo con la licencia Creative Commons BY-NC-ND
Atribución-NoComercial-Sin Obra Derivada.

5. **Nota de Embargo:** Para aquellas obras que NO pueden ser de acceso a texto completo por razones de acuerdos previos con empresas o instituciones; por razones de índole comercial u otras razones; se procederá según lo establecido en Art. 6 de la Ley 26899 de Repositorios digitales institucionales de acceso abierto:

ARTICULO 6º — En caso que las producciones científico-tecnológicas y los datos primarios estuvieran protegidos por derechos de propiedad industrial y/o acuerdos previos con terceros, los autores deberán proporcionar y autorizar el acceso público a los metadatos de dichas obras intelectuales y/o datos primarios, comprometiéndose a proporcionar acceso a los documentos y datos primarios completos a partir del vencimiento del plazo de protección de los derechos de propiedad industrial o de la extinción de los acuerdos previos antes referidos.

Asimismo, podrá excluirse la difusión de aquellos datos primarios o resultados preliminares y/o definitivos de una investigación no publicada ni patentada que deban mantenerse en confidencialidad, requiriéndose a tal fin la debida justificación institucional de los motivos que impidan su difusión. Será potestad de la institución responsable en acuerdo con el investigador o equipo de investigación, establecer la pertinencia del momento en que dicha información deberá darse a conocer. A los efectos de la presente ley se entenderá como “metadato” a toda aquella información descriptiva sobre el contexto, calidad, condición o características de un recurso, dato u objeto, que tiene la finalidad de facilitar su búsqueda, recuperación, autenticación, evaluación, preservación y/o interoperabilidad.

En razón de lo expuesto, si el Trabajo se encuentra comprendido en el caso de que su producción esté protegida por derechos de Propiedad Industrial y/o acuerdos previos con terceros que implique la confidencialidad de los mismos, el/la directora/a debe indicar a continuación motivos y fecha de finalización del embargo:

NO SE AUTORIZA la publicación antes de la fecha ___/___/_____ por lo siguientes motivos:

.....
.....
.....
.....
.....

Cumplido el plazo del embargo, estará accesible a texto completo según contempla la normativa vigente.

Director/a del TFG

Índice

Índice	2
Marco Teórico	5
Origen de los Hidrocarburos	5
Pozos Petroleros	9
Yacimientos Convencionales	9
Yacimientos no convencionales	10
Shale oil/ Shale gas	11
Tight oil/ Tight gas	13
Vaca Muerta	15
Fractura Hidráulica (Fracking)	20
Perforación de un Pozo Petrolero	24
Taladro (Rig)	30
Introducción	32
Situación Actual	32
Análisis de la carga	33
Desarrollo	42
Solución propuesta	42
Alternativa 1	43
Dimensionamiento de equipos	45
Alternador	46
Motor asincrónico	49
Variador de frecuencia	51
Carretel	57
Cable	65
Elección por corriente	66
Condiciones de instalación de referencia	72
Factores de corrección	73
Corriente admisible	78
Dimensiones finales	82
Verificación por caída de tensión	84
Transformador	88
Celdas de MT	93
Verificación mecánica del carretel	98
Flexión tambor	98
Pandeo	104
Flexión árbol central	106
Verificación tráilers	112

Verificación estructural estación transformadora	122
Verificación estructural genset	128
Cálculo de los cortocircuitos	133
Ubicación geográfica de interés	133
Potencia de cortocircuito de la red	136
Relación R/X de la red	139
Cálculo de las impedancias	139
Red	139
Transformador	141
Motor	142
Cable	143
Corrientes de cortocircuito	146
Cortocircuito trifásico máximo	147
Cortocircuito monofásico mínimo	149
Aparataje	151
Protecciones de los equipos	151
Seccionadores sin carga	176
Esquema unifilar	178
Alternativa 2	180
Dimensionamiento de equipos	182
Motor sincrónico	182
Caja reductora	183
Esquema unifilar	196
Ventajas y desventajas	197
Ventajas	197
Desventajas	197
Comparación con variadores de frecuencia	198
Alternativa 3	200
Dimensionamiento de los equipos	202
Convertidor de frecuencia (Static Frequency Converter - SFC)	202
Esquema unifilar	205
Ventajas y desventajas	206
Análisis ambiental	209
Comparación emisiones	214
Análisis económico	219
Comparación costos de operación	219
Rentabilidad y recuperación de la inversión del proyecto	223
Modelos 3D	233
Estación transformadora móvil	233
Estación generadora móvil	235

Conclusión	237
Referencias	239

Resumen

La tesis aborda una problemática central en el desarrollo energético de Vaca Muerta, donde actualmente los equipos de perforación de pozos se alimentan mediante grupos electrógenos diésel, tecnología que presenta elevados costos operativos y un notable impacto ambiental debido a sus emisiones contaminantes.

Dado el contexto global y local de transición energética, el trabajo propone analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental de reemplazar estos generadores diésel por un sistema de alimentación eléctrica proveniente de la red de media tensión disponible en la zona.

Para ello, se estudia en detalle:

- El comportamiento eléctrico del taladro (potencia, picos de carga, factor de potencia), utilizando mediciones reales aportadas por operadoras de Vaca Muerta. Las limitaciones técnicas asociadas a la diferencia entre la red existente (33 kV, 50 Hz) y los requerimientos del taladro (600 V, 60 Hz).
- El diseño y dimensionamiento de equipos clave para la conversión y transporte de energía: generador sincrónico, motor de inducción, variador de frecuencia, transformador, carretel y cableado de media tensión, además de sus verificaciones mecánicas, eléctricas y estructurales.
- La evaluación de tres alternativas tecnológicas posibles para la conversión de energía y su comparación operativa.

- Un análisis complementario ambiental, cuantificando la reducción de emisiones respecto del uso de diésel.
- Un estudio económico, estimando costos de operación, inversiones requeridas y tiempo de recuperación.

El trabajo concluye ofreciendo una solución flexible y móvil que permite conectar la red eléctrica a distintos puntos del yacimiento, demostrando que la electrificación del taladro es técnica y económicamente viable, con beneficios ambientales significativos.

“Argentina posee uno de los recursos de petróleo y gas no convencionales más importantes del mundo. Es muy probable que una proporción destacada de estos recursos se reclasifiquen en reservas, convirtiendo a nuestro país en un significativo productor y eventual exportador de petróleo y gas de reservorios no convencionales.

Los hidrocarburos ‘convencionales’, que se han explotado tradicionalmente desde hace más de un siglo, son exactamente los mismos que los llamados no convencionales. La principal diferencia es la forma en que se encuentran almacenados, tanto el gas como el petróleo.”

(Skalany, 2018, p.4)

Marco Teórico

Origen de los Hidrocarburos

“El petróleo y el gas tienen origen orgánico; son producto de la materia orgánica contenida en ciertos sedimentos, transformada con el paso del tiempo:

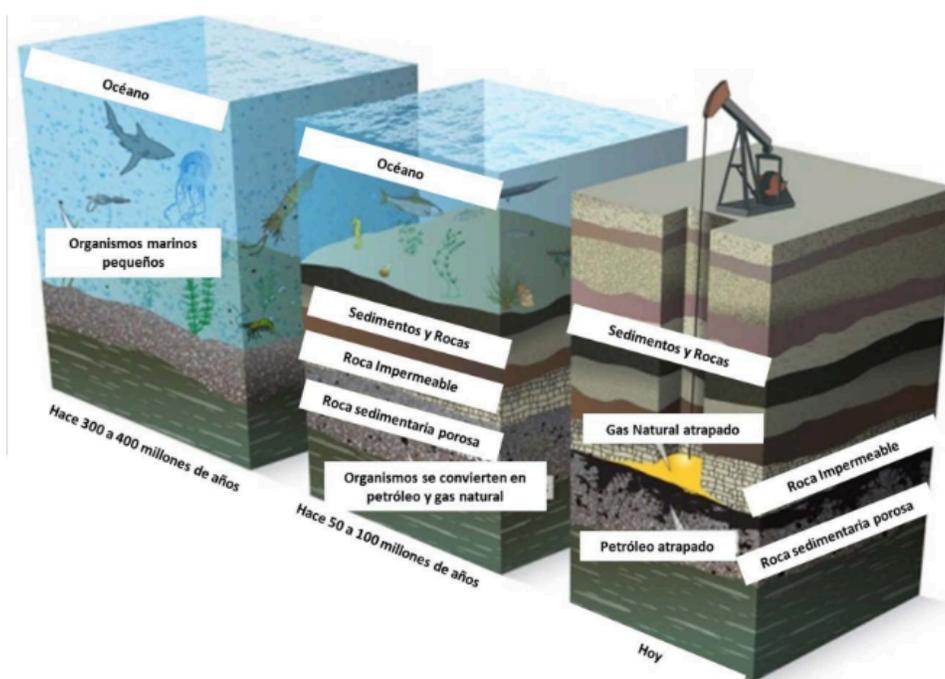
- Los sedimentos arrastrados por los ríos se depositan en los mares, que tienen una vida vegetal y animal más o menos intensa, que genera grandes volúmenes de materia orgánica.
- El conjunto de la biomasa marina de tipo animal
- El conjunto de la biomasa marina vegetal

Todos estos seres vivos marinos, sometidos al ciclo de la vida, caerán al fondo de los océanos, mares o lagunas al morir, quedando mezclados con los sedimentos. La mayoría de esta biomasa orgánica desaparecerá por descomposición: oxidación lenta o rápida, digestión por toda una ‘cadena alimentaria’, cuya última etapa está formada por bacterias.

Pero una parte se conservará, especialmente cuando la biomasa se deposita en medios reductores pobres en oxígeno y pobres en bacterias, produciendo entonces depósitos sedimentarios ricos en materia orgánica. Si bien se piensa que estas cantidades preservadas no superan el 1% del total de la materia orgánica generada, a lo largo del tiempo geológico representan cantidades muy importantes. Es ésta la materia orgánica que constituye el origen de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural).

Los yacimientos de petróleo y gas provienen de los compuestos químicos (fundamentalmente lípidos, proteínas e hidratos de carbono) existentes en el plancton marino y también en plantas terrestres. La formación de los hidrocarburos (líquidos o gaseosos) a partir de estos restos orgánicos es un largo y lento proceso geológico, cuyo comienzo parece coincidir con épocas geológicas de gran mortandad, en las que, por alguna razón, desaparecieron del planeta gran cantidad de especies de seres vivos.

Figura 1



Nota. Capas formadas a lo largo de los años.

El petróleo no se encuentra distribuido de manera uniforme en el subsuelo. Ello implica una migración desde la roca en que inicialmente se formaron (roca madre) hasta el lugar en que finalmente se encuentra el yacimiento (roca almacén).

De esta forma, los hidrocarburos líquidos y gaseosos producidos, que inicialmente estarían dispersos en la roca madre, se moverían a través de los poros y fracturas de la formación, probablemente como un fluido impulsado por la presión generada por el calentamiento del agua intersticial o puede que dispersos en una fase acuosa empujada por el peso de los sedimentos acumulados. Llegarían así a una zona de menor presión, constituida por una roca almacén también porosa y fracturada (arenisca, caliza, dolomía, etc.), a menudo más superficial, donde se produciría finalmente una separación gravimétrica o por capilaridad de los tres fluidos que normalmente coexisten: el gas queda en la parte superior, el petróleo en la zona intermedia y el agua en la parte inferior del depósito.

Se entiende que para que esta acumulación de hidrocarburos en la roca almacén tenga lugar es necesario la existencia en el entorno de la misma de una barrera constituida por una roca sello impermeable (evaporita, pizarra, etc.), que, junto con una adecuada configuración geológica (trampa), bien sea estructural o estratigráfica, impida que la migración de los hidrocarburos continúe hacia la superficie.” (Herrera Herbert, 2020, p.9).

A continuación se describen algunos términos que son importantes para entender la diferencia entre los yacimientos convencionales y los no convencionales:

“Roca madre: Se entiende por roca madre a aquella unidad sedimentaria que ha generado y expulsado suficiente petróleo o gas como para que sea acumulable y explotable de forma económicamente rentable.

Roca almacén: Por roca almacén se entiende una roca lo suficientemente porosa y permeable como para que pueda almacenar petróleo en cantidad explotable de forma económicamente rentable. Esta roca además ha de ser cerrada y tener alguna relación física

con la roca madre, ya sea por una fractura que permita el paso de los hidrocarburos o bien por contacto directo.

Porosidad: Conviene distinguir entre porosidad total, que se refiere al volumen total de poros, huecos o fisuras que contiene la roca, y porosidad útil o efectiva, que representa el volumen de estos mismos conectados entre sí. La porosidad de los almacenes en los yacimientos petrolíferos, varía entre un 5 y un 40 %, siendo la más común, la comprendida entre un 10 y un 25 %.

Permeabilidad: Es la capacidad de una roca de permitir la circulación de fluidos líquidos o gaseosos a través de la misma. Pero si estos no están conectados entre sí la permeabilidad será nula, independientemente de cuál sea la porosidad de la roca. Depende del tamaño y forma del grano, así como de su grado de compactación. Por lo general un tamaño grande de grano y una forma próxima a la esférica favorecen la permeabilidad. Por el contrario, la presencia de un cemento intergranular, como por ejemplo la arcilla, la disminuye.

La permeabilidad k se mide en darcys o milidarcys. La permeabilidad es de 1 darcy, cuando 1 cm³ de fluido, de viscosidad 1 centipoise, pasa en 1 segundo a través de una muestra de roca de sección 1 cm² y 1 cm de longitud, bajo una presión diferencial de 1 atmósfera. El darcy, es en la práctica una unidad demasiado grande, utilizándose corrientemente el milidarcy. Una roca con buena permeabilidad corresponde a 100 md o superior, mientras que una roca poco permeable tendría menos de 50 md. La permeabilidad más frecuente de los almacenes que se encuentran en los yacimientos petrolíferos, varía en general, entre 5 y 1.000 milidarcys.

En ingeniería de explotación de yacimientos, la permeabilidad tiene mucha más importancia que la porosidad. Se han visto a menudo, rocas porosas impregnadas de petróleo, incapaces de producir por falta de permeabilidad. En estos casos es práctica frecuente aumentar la permeabilidad artificialmente por procedimientos de fracturación y acidificación,

que abren fisuras nuevas en la roca, o aumentan el tamaño de las preexistentes, facilitando la circulación de fluidos, y por consiguiente, permitiendo su explotación.” (Herrera Herbert, 2020, p.26).

Pozos Petroleros

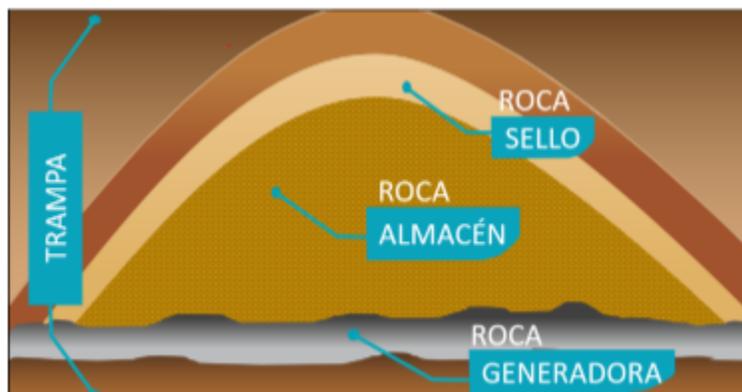
Yacimientos Convencionales

“Para un yacimiento convencional el hidrocarburo se encuentra alojado en una formación permeable, es decir, cuyos poros están interconectados entre sí. Al igual que en una esponja, los fluidos (el gas y el petróleo) pueden moverse entre los poros. Dicho de otro modo, pueden ‘viajar’ por el interior de esas formaciones, normalmente en dirección a la superficie. Eso es un yacimiento de hidrocarburos convencionales: una roca reservorio permeable, cuyos hidrocarburos almacenados se encuentran atrapados por una roca ‘sello’ impermeable.” (Skalany, 2018, p.4).

“Se debe comprender que la acumulación de hidrocarburos se da dentro de la roca, en espacios porosos. En los yacimientos convencionales el hidrocarburo se acumula en una roca con alta porosidad y permeabilidad, propiedades que, al generar un desbalance de presión permiten el flujo de hidrocarburos hacia el pozo perforado.

En cuanto a su caracterización, el yacimiento convencional es aquel que está compuesto por un sistema petrolífero. Esto quiere decir que para su existencia se requiere la presencia de una roca generadora, una roca almacén y una roca sello. Además, es necesario que hubiese ocurrido un proceso generador de trampas estratigráficas o estructurales, junto con un proceso de migración y acumulación de hidrocarburos en las mencionadas trampas; todo con una sincronización o timing específico.

Figura 2



Nota. Sistema petrolífero convencional.

El desarrollo de los yacimientos convencionales puede ser mediante pozos verticales, desviados u horizontales, con técnicas de extracción convencionales usadas para la obtención del hidrocarburo.” (Instituto de Ciencia Política Hernan Echevarría Olózaga [ICP], 2022, p.74).

Yacimientos no convencionales

“Por otro lado, los yacimientos no convencionales hacen referencia a acumulaciones de petróleo y/o gas que no requieren de todos los componentes del sistema petrolífero convencional ya mencionados para su acumulación y existencia. Esto quiere decir que se pueden encontrar entrampados en la roca generadora (lutita de petróleo o gas CBM), en rocas con propiedades petrofísicas diferentes (arenas apretadas), carentes de trampa y de roca sello lo que permite su acumulación en el subsuelo (arenas bituminosas) o fluidos bajo condiciones termodinámicas diferentes (hidratos de gas).

Antes de abordar la temática se debe hacer la claridad que el término yacimientos no convencionales (YNC) no refiere directamente a la técnica de fracturamiento hidráulico con perforación horizontal FHPH, sino que hace referencia a diferentes tipos de rocas o sistemas roca-fluido contenedores de hidrocarburos cuyas propiedades petrofísicas y geológicas exigen

requerimientos técnicos diferentes a los desarrollados para yacimientos tradicionales. Los hidrocarburos líquidos y gaseosos existentes en un yacimiento no convencional no poseen propiedades diferentes a los hidrocarburos ya conocidos en los yacimientos convencionales; en otras palabras, los hidrocarburos poseen las mismas propiedades y componentes ya conocidos.” (ICP, 2022, p.76).

“En la Argentina, cuando hablamos de ‘no convencionales’, nos referimos específicamente a dos tipos de hidrocarburos: los de las formaciones ‘shale’, como Vaca Muerta, y los de las formaciones ‘tight’. En ambos casos, se trata de formaciones muy compactas. Las ‘tight’, de baja permeabilidad. Las ‘shale’, directamente impermeables.” (Skalany, 2018, p.5).

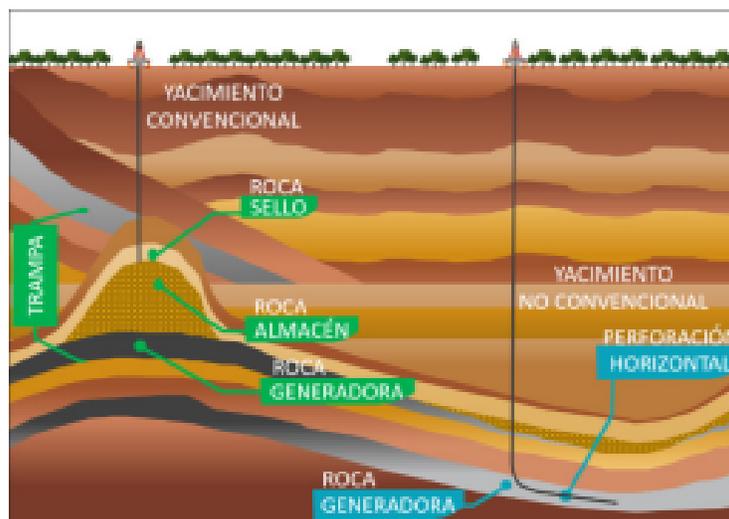
Shale oil/ Shale gas

“En el caso del shale (que los geólogos identifican como lutitas y margas), se trata de rocas formadas a partir del lecho de lagos y mares. En ellas, a lo largo de millones de años, la materia orgánica atrapada (restos de microorganismos, algas, animales, etc.) se convirtió en gas y petróleo. Esta es la denominada roca madre o generadora.” (Skalany, 2018, p.5).

“Este tipo de yacimiento es conocido comúnmente por encontrarse en la roca generadora de hidrocarburos del sistema petrolífero convencional. El objetivo es extraer el hidrocarburo que no logró migrar de la roca hacia otras formaciones suprayacentes. Esta roca posee permeabilidades en el orden de los nanodarcies, específicamente entre 1 y 100 nanodarcies, lo que no permite la fluidez de los hidrocarburos a través de la roca. Su porosidad se encuentra entre 5% - 12%.

Es importante tener un punto de referencia para realizar el comparativo del tamaño de los poros existentes en la roca. El tamaño medio del espacio poroso capaz de acumular hidrocarburo es de 20 nm.

Figura 3



Nota. Yacimiento convencional y yacimiento no convencional.

Este tipo de yacimientos no convencionales requieren de la utilización del fracturamiento hidráulico con perforación horizontal FHPH. Esta tecnología es el resultado de la unión de dos técnicas generadas desde la ingeniería para mejorar la producción de hidrocarburos.

La primera técnica es el fracturamiento hidráulico, el cual busca mejorar la permeabilidad a partir de la generación de fracturas en la roca con la inyección de fluido a alta presión (normalmente agua), material sostén o propante que mantiene las fracturas generadas abiertas y ciertos químicos que favorecen la inyección del fluido e interacción con la roca. La segunda técnica es la perforación de pozos horizontales, esto quiere decir que, al momento de la perforación a partir de una profundidad escogida en la lutita, la trayectoria del pozo es horizontal o paralela a la inclinación de la roca de interés.” (ICP, 2022, p.85).

Tight oil/ Tight gas

“Los yacimientos de arenas apretadas son algunos de los yacimientos no convencionales más importantes en el mundo debido a los grandes volúmenes que se ha

podido cuantificar. Es el gas atrapado en el espacio poroso y fracturas en rocas de muy baja permeabilidad y/o por adsorción en kerógeno, y posiblemente en partículas de arcilla el cual se libera cuando se desarrolla un diferencial de presión. Por lo general, requiere un gran fracturamiento hidráulico para facilitar la producción comercial.

Normalmente este tipo de yacimientos pueden encontrarse naturalmente fracturados, lo que económicamente es favorable para el desarrollo de los recursos fósiles. Sin embargo, el hecho de estar naturalmente fracturado no es excluyente de que se realicen labores de fracturamiento hidráulico de máximo dos fracturas en pozo vertical o desviado.” (ICP, 2022, p.79).

A modo de resumen, se adjuntan las Figuras 4 y 5 donde se mencionan las características y diferencias que existen entre los yacimientos convencionales y los no convencionales:

Figura 4

Yacimientos convencionales	Yacimientos no convencionales (tipo shale)
Existencia de una roca reservorio porosa y permeable para la acumulación de hidrocarburos.	Existencia de una roca reservorio de muy baja porosidad y permeabilidad
Acumulación relacionada a una trampa con una roca impermeable que evita su fuga.	No necesita de una trampa para su acumulación, debido a que los hidrocarburos se alojan en la roca madre.
Normalmente presentan dentro del reservorio un límite definido o una separación inferior, entre los hidrocarburos y el agua.	No hay límites definidos entre los hidrocarburos y el agua en la roca que los aloja.
Normalmente no necesitan estimulaciones (mejora artificial de la permeabilidad) para producir. Cuando lo requieren es a una escala mucho menor que la de los no convencionales.	Necesitan estimulación artificial para producir (fracturación) de gran envergadura.
Predominan los pozos verticales sobre los horizontales.	Mejor producción con pozos horizontales.

Nota. Diferencias entre yacimientos convencionales y yacimientos no convencionales.

Figura 5

	Pozo convencional con estimulación	Pozo no convencional	Pozo convencional sin estimulación
Locaciones	Pozo único 80 x80 m	Pozos múltiples 150 x 150 m	Pozo único 80 x80 m
Tipo de Pozo	Vertical o Dirigido	Vertical y Horizontal	Vertical o Dirigido
Equipos de perforación	rotativos	rotativo	rotativos
Fluidos de Perforación	Iguals (lodos)	Iguals (lodos)	Iguals (lodos)
Entubamiento y Aislamiento (**)	Iguals	Iguals	Iguals
Estimulación¹⁰	Cuando lo requiera	siempre	No
Presión(*)	Aprox. 150 kg/cm ²	Aprox. 200 kg/cm ²	No
Agente sostén (5%)	Arena (sílice)	Arena (sílice)	No
Agua(94,5%)	1200 m ³	1700 y 3200 m ³ (vertical)	No
Aditivos(0,5%)	Bactericidas; Gelificante; Surfactante; Antifricción; Desincrustantes	Bactericidas; Gelificante; Surfactante; Antifricción; Desincrustantes	No
Producción (Vida útil del pozo)	Primaria; recuperación secundaria y terciaria	Primaria	Primaria; recuperación secundaria y terciaria
Origen de Agua de fractura	Agua de formación y agua dulce	Agua de formación y agua dulce	no
Area de extracción	amplia	restringida	amplia

Nota. Diferencias entre yacimientos convencionales y yacimientos no convencionales.

“La diferencia radica en la presión ejercida para obtener la fractura (dada por la profundidad y características de la formación) y el volumen de agua utilizado para obtener la fractura.

Tanto el proceso de perforación como la producción del pozo no difieren entre yacimientos convencionales y no convencionales.” (Skalany, 2018, p.13).

Vaca Muerta

“En el país existen diecinueve cuencas sedimentarias (Figura 6), de las cuales solo cinco han sido comercialmente explotadas desde que se descubriera el petróleo en 1907.

Figura 6



Nota. Cuencas sedimentarias.

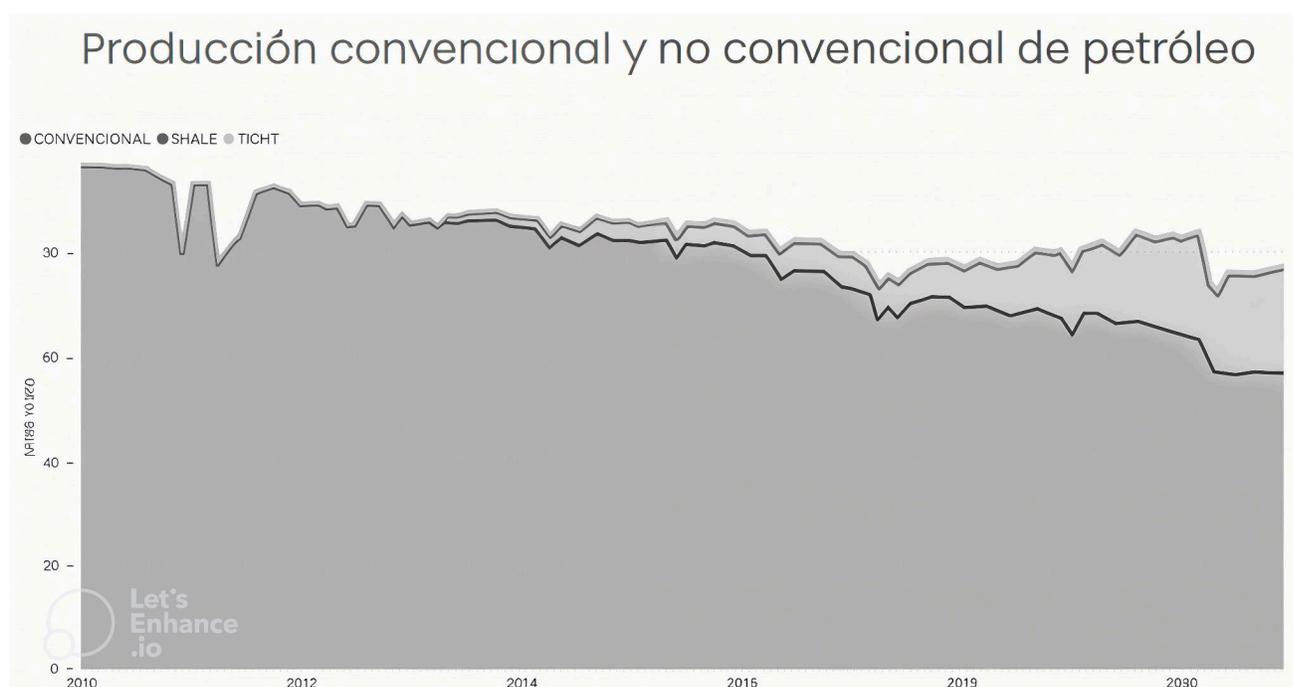
Las cinco cuencas productivas se encuentran en un estado maduro de explotación, dependiendo de recuperación secundaria y terciaria una vez agotada la presión natural del reservorio. Es por ello que en algunas de ellas, especialmente la cuenca Neuquina, pero también en el área Santa Cruz Sur de la cuenca Austral, se empezó a replicar a inicios de la

década pasada la experiencia acumulada a partir de principios de siglo en EE.UU, con el proceso de aumento de producción hidrocarburífera a partir de la técnica de fractura hidráulica.

Es importante destacar que la explotación hidrocarburífera por técnicas no convencionales no se desarrolló para reemplazar a la convencional, sino para complementarla, ante la ausencia de descubrimientos exploratorios que permitieran sostener y, posteriormente, aumentar la producción petrolera y gasífera de Argentina.

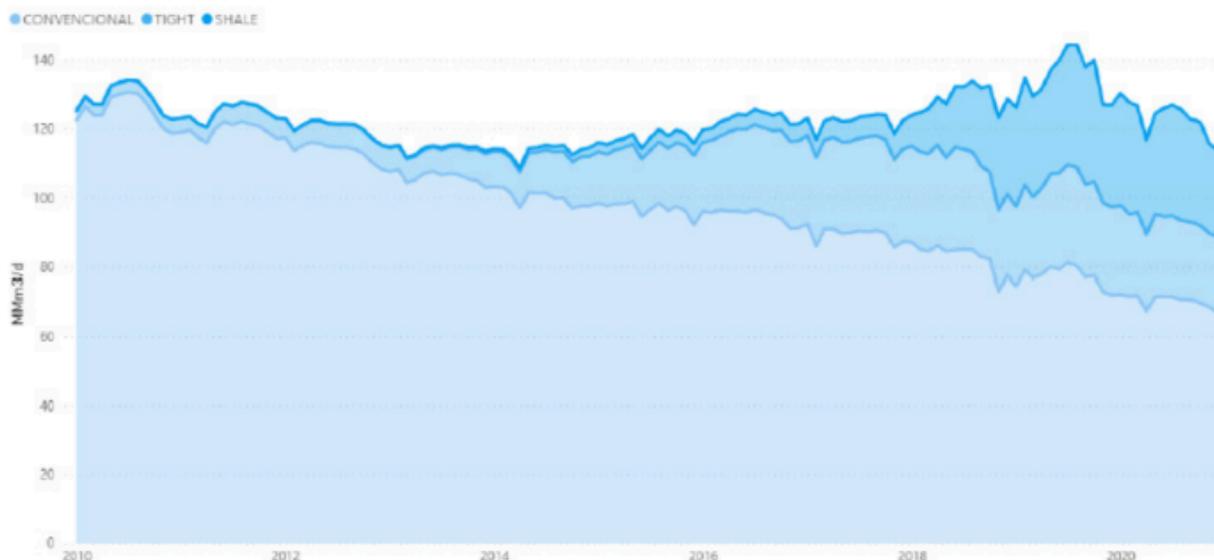
La relevancia que ha adquirido la explotación no convencional en Argentina en los últimos años, ante la ausencia de descubrimientos exploratorios de reservorios convencionales, queda reflejada en el rol que ha tenido para compensar el decline de la explotación convencional tanto para petróleo, como —y en mayor medida— para gas natural (Figura 7 y 8).

Figura 7



Nota. Producción convencional y no convencional de petróleo.

Figura 8

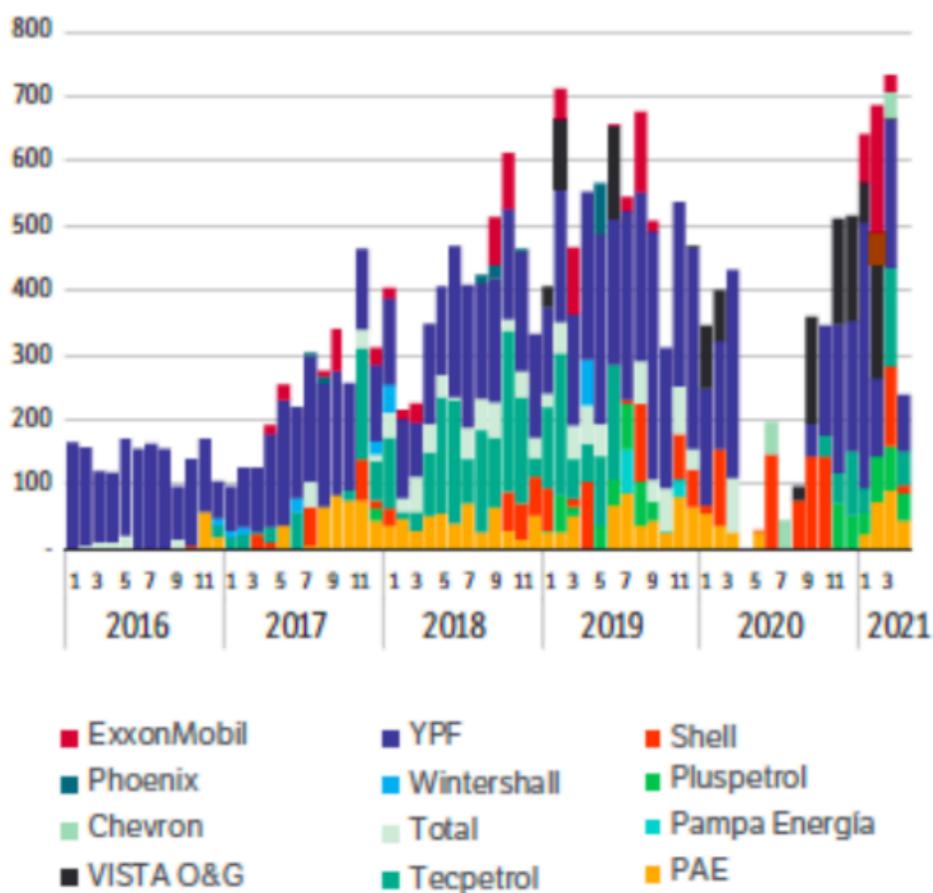


Nota. *Producción convencional y no convencional de gas natural (en Nm³/d).*

El despegue de la explotación no convencional en Argentina, liderado por el punzado de roca formadora Vaca Muerta en la cuenca Neuquina, se inició en 2013 luego de la nacionalización del 51% de las acciones de la compañía Repsol-YPF (otrora estatal y privatizada en la década de 1990), que pasó a llamarse simplemente YPF, la cual —en asociación con Chevron— comenzó a explorar y posteriormente explotar la concesión Loma Campana, en la ventana de black/volatile oil de la mencionada formación rocosa.

Una manera de visualizar la aceleración que tuvo la explotación hidrocarburífera no convencional en Vaca Muerta es a partir de la cantidad de fracturas mensuales realizadas en esa roca formadora en el último quinquenio (Figura 9).” (ICP, 2022, p.282).

Figura 9



Nota. Etapas de fractura mensuales en Vaca Muerta.

“Vaca Muerta es la principal formación de shale en la Argentina. Su gran potencial se debe a sus características geológicas y su ubicación geográfica.

La formación tiene entre 60 y 520 metros de espesor, lo que permite en algunos casos el uso de perforación vertical, con lo que se reduce significativamente los costos de extracción y mejora la viabilidad económica para la extracción de estos recursos.

Vaca Muerta tiene 4 propiedades geológicas que la distinguen como una formación de shale única en el mundo: importante cantidad de Carbón Orgánico Total (TOC), alta presión, buena permeabilidad y gran espesor.

A su vez, a diferencia de lo que ocurre con otras formaciones de shale, se encuentra alejada de centros urbanos, lo que facilita notablemente las operaciones.

Otra ventaja es que se encuentra a una profundidad mayor a los 2.500 metros, muy por debajo de los acuíferos de agua dulce, lo cual hace más segura su extracción y disminuye los riesgos ambientales.” (Skalany, 2018, p.10).

Para abarcar la situación actual y las proyecciones a futuro del yacimiento, se va a hacer referencia a un informe realizado por PwC Argentina en Noviembre de 2024. PwC Argentina es la filial en Argentina de PricewaterhouseCoopers (PwC), una de las firmas más grandes y prestigiosas de servicios profesionales a nivel global. Entre los servicios que ofrecen se encuentran los de auditoría, consultoría, asesoramiento financiero y gestión de riesgos.

“Vaca Muerta podría generar un superávit en la balanza energética de u\$s30.000 millones en 2030. Así lo estimaron expertos de PwC Argentina, que presentó un reciente informe donde proyectaron una producción récord estimada de 1 millón de barriles de petróleo y más de 250 millones de metros cúbicos de gas por día. Para llegar a nivel de actividad, calcularon que las inversiones en la formación neuquina alcanzarán los u\$s200.000 millones desde el inicio de su explotación en 2013.

El informe de PwC detalla que en agosto de 2024 Vaca Muerta alcanzó una producción de 403.000 barriles de petróleo y 83 millones de m³ de gas por día, representando más de la mitad de la producción de hidrocarburos del país y con un crecimiento interanual del 35% en petróleo y 22% en gas. ‘El ritmo de crecimiento interanual ha sido sostenido a niveles de doble dígito, y la formación aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo’, subrayó el trabajo. Según pudo saber Energy Report, los últimos datos oficiales de Neuquén señalan que en septiembre la Cuenca Neuquina llegó a la 446.890 barriles por día de producción y a 109,9 MMm³/d de gas.

Según el estudio de PwC, uno de los factores para atraer inversiones es el régimen de promoción RIGI y sus incentivos para proyectos. ‘Uno de los puntos más destacados de la reglamentación fue la definición de los sectores y subsectores de la economía que podrán gozar del régimen promocional’, sostuvieron. Juan Manuel Magadan, socio de PwC Argentina de la práctica de Tax & Legal, apeló al Régimen de Incentivos a la Inversión (RIGI) como herramienta para atraer nuevas inversiones. ‘El RIGI jugará un rol fundamental en el desarrollo de la infraestructura necesaria para que Vaca Muerta alcance su potencial. Este marco regulatorio permite atraer inversiones estratégicas mediante incentivos fiscales que faciliten proyectos clave de infraestructura para optimizar su capacidad productiva y exportadora’, afirmó.” (PricewaterhouseCoopers [PwC], 2024).

Fractura Hidráulica (Fracking)

“El fracturamiento hidráulico es una técnica que busca mejorar la permeabilidad del yacimiento a partir de la inyección presurizada de un fluido compuesto por agua, propano o agente sostén y químicos a través de un pozo que está en contacto con la roca (USGS, s.f.). La intención de este proceso es la creación de nuevas fracturas que permitan aumentar la permeabilidad de la roca estimulada y como objetivo subsiguiente, la interconexión entre las fracturas naturales preexistentes producto de la dinámica entre las placas tectónicas y las fracturas hidráulicas generadas. El fracturamiento hidráulico es un tratamiento de estimulación ejecutado de forma rutinaria en los pozos de petróleo y gas a los yacimientos convencionales de baja permeabilidad desde la década de los 40s (Schlumberger, s.f.a.).

Antes de aplicar el fracturamiento hidráulico se deben realizar, entre muchos otros, los estudios geomecánicos, cuyo objetivo es estudiar las propiedades mecánicas y elásticas de las rocas e identificar la dirección y magnitud de los esfuerzos a los que serán sometidas, en este caso aquellos generados por la presión hidráulica. A partir de este entendimiento, se logran

ajustar modelos matemáticos que permiten determinar un comportamiento aproximado de las fracturas desarrolladas, prever futuros inconvenientes y generar un diseño de fractura y de fluidos ajustado para lograr el objetivo planteado. Estos análisis son de carácter obligatorio para evitar el desencadenamiento de impactos ambientales.

En el caso de los yacimientos de lutitas se requiere una mayor caracterización debido a la existencia de heterogeneidades y anisotropía, características que aumentan la complejidad de las fracturas generadas. Las fracturas generadas no son planares, lo que implica que se tienen caminos preferentes de propagación primarios y caminos secundarios que aparecen según la interacción con fracturas naturales y las mismas propiedades de la roca.

El componente que aporta la permeabilidad al volumen de yacimiento estimulado es el propante, el cual es agregado al fluido antes de ser bombeado y cuyo tamaño puede variar entre los 0.1 y 2 milímetros de diámetro (King, s.f.). Este propante debe lograr situarse casi en la totalidad de la longitud de las fracturas generadas. La fase continua, o agua, debe ser capaz de llevar el propante hasta la ubicación deseada dentro de la fractura generada en la roca, por lo cual se deben agregar químicos al fluido para evitar que el propante se precipite o ubique en lugares no deseados. Al situar el propante en los lugares deseados, este mantendrá abiertas las fracturas y permitirá que los hidrocarburos fluyan a través de las fracturas hacia el pozo.

Para lograr la viabilidad económica de los proyectos, se requiere aumentar la proporción de yacimiento estimulado y lograr una mayor tasa de hidrocarburos producidos desde un mismo pozo perforado. Para esto, se realizan varias etapas de fracturas distribuidas en diferentes puntos de la sección horizontal del pozo para optimizar la inversión generando una mayor cantidad de fracturas controladas desde un mismo pozo. De aquí nace el concepto fracturamiento hidráulico con perforación horizontal FHPH; esta técnica también puede ser llamada fracturamiento hidráulico multietapa en perforación horizontal.” (ICP, 2022, p.87).

“La etapa de fracturamiento inicia con el cañoneo del revestimiento y el cemento, esto es la generación de pequeños agujeros que conectan el interior del pozo y la roca, los cuales serán los canales preferentes por donde la fractura se generará.

Una vez terminada esta operación, en superficie se dispone de tanques para el almacenamiento de agua y tanques areneros o de propante. Para la puesta en condición del fluido a ser usado en la fractura se inicia con la alimentación de los compuestos que se van a adicionar en el tanque de mezcla (blender), este realiza la mezcla de propante, agua y de aditivos utilizados para mejorar propiedades de la mezcla generada. Una vez el fluido está en condiciones de diseño, se traslada al manifold, equipo que distribuye los fluidos a las bombas hidráulicas. Las bombas aumentan la presión del fluido hasta llevarlo a la presión requerida. Posteriormente, desde el manifold se bombea el fluido presurizado hacia el pozo y se conecta al cabezal del pozo, desde donde se direcciona hasta la sección seleccionada, la cual ha sido previamente cañoneada.

Todos estos procedimientos en superficie y en subsuelo son constantemente monitoreados en el centro de comando, el cual está siempre alerta de que ningún parámetro salga de los límites operacionales permitidos.

El fluido de fractura está compuesto por arena + agua en un 99.51% y por aditivos químicos (máximo 7) el restante 0.49%. Dependiendo del número de fases, este proceso se puede repetir desde 2 hasta 20 veces en promedio en distintos intervalos (fases).

Figura 10



Nota. Adaptación gráfica. Químicos usados en un fluido de fractura.

Respecto al agua, en un principio y dependiendo de las características de la formación, puede retornar entre el 20% y el 60% del agua usada en el fracturamiento, lo que se conoce como flowback. Cabe resaltar que otro porcentaje del agua saldrá cuando se inicie la fase de producción del pozo. Esta agua de retorno viene con gran cantidad de cloruros y carbonatos, por lo cual es tratada para ser reutilizada en futuras estimulaciones para reducir la huella hídrica.

Para el fracturamiento de cada una de las etapas, se sitúan tapones dentro del pozo que permiten aislar la zona específica que será fracturada de todas las demás secciones. La razón de esto es para optimizar la energía utilizada en el proceso y focalizar la presión en la generación de fracturas.

Figura 11



Nota. Sistema de aislamiento de la zona a estimular.

Finalizado el proceso de ejecución de todas las etapas programadas, se retiran los tapones y el pozo empieza a producir fluidos. Inicialmente se debe generar un desbalance de presión entre la formación, el pozo y la superficie para forzar la movilización de los fluidos. Primero se produce parte del fluido de fracturamiento, posteriormente el pozo comenzará a producir hidrocarburos los cuales salen de forma controlada a superficie.” (ICP, 2022, p.92).

Perforación de un Pozo Petrolero

“El proceso de perforación consiste en la excavación de un pozo de sección circular mediante la rotación de un trépano de perforación y la aplicación de una fuerza de empuje en el fondo. Mediante la acción combinada de ambos, se produce el progresivo arranque de fragmentos de roca que son extraídos con la circulación del fluido de perforación que se inyecta a través de la sarta. Este fluido es un lodo compuesto por agua, arcilla y varios productos químicos, que tiene además la función de dar consistencia a las paredes del pozo y refrigerar la broca, que retorna a la superficie por el espacio anular que queda entre la sarta y las paredes del pozo.

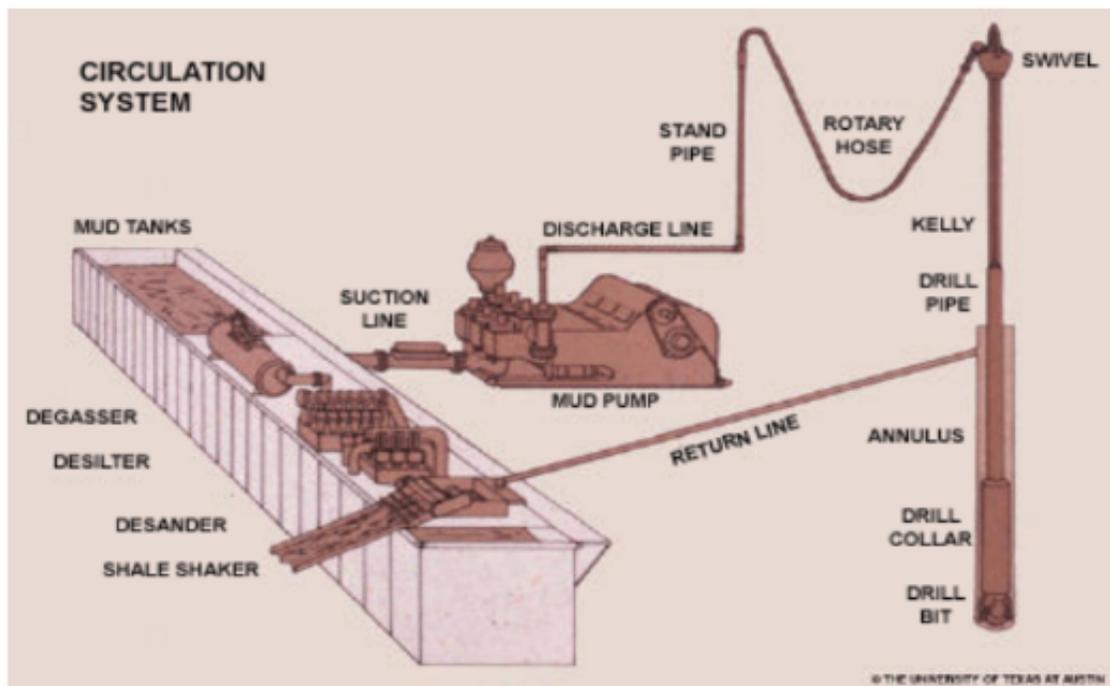
El movimiento de rotación de la sarta se genera y aplica a la sarta de perforación en la superficie por medio de la mesa de rotación o bien por medio del top drive, aunque también existe la posibilidad de generarlo hidráulicamente mediante un motor de fondo conectado a la barrena. Por su parte, la fuerza de empuje se genera con el propio peso de una parte de la sarta de perforación.

En superficie se dispone de un conjunto de instalaciones necesarias durante la perforación, entre las que destaca la de limpieza y reacondicionamiento del lodo de perforación, destinada a la limpieza en profundidad del lodo retornado, la separación de todos los contenidos e impurezas que ha recogido durante la operación, y para el posterior reacondicionamiento para devolverle las propiedades deseadas y su reinyección al pozo.

El fluido de perforación, tiene como funciones refrigerar la barrena de perforación, mantener las paredes del pozo, transportar los cuttings de perforación a superficie. El lodo en su retorno por el espacio anular, pasa a través de los 'shakers' o cribas vibratorias, donde se separan los ripios o 'cuttings'. Para las partículas sólidas más pequeñas se utilizan desarenadores centrífugos. Posteriormente el lodo pasa a través de un desgasificador que elimina el potencial gas contenido en el lodo. El lodo limpio es recirculado al pozo a través de la tubería de perforación como se ha indicado antes.

El 'Blow Out Preventer (BOP)' o preventor de erupciones, se instala en la parte superior de la cabeza del casing antes de que se inicie la perforación. Dispone de válvulas de seguridad de alta presión, diseñadas para sellar el pozo y bloquear las fugas de gases y fluidos para evitar que pueda producirse un blow out.

Figura 12



Nota. Esquema del sistema de circulación.

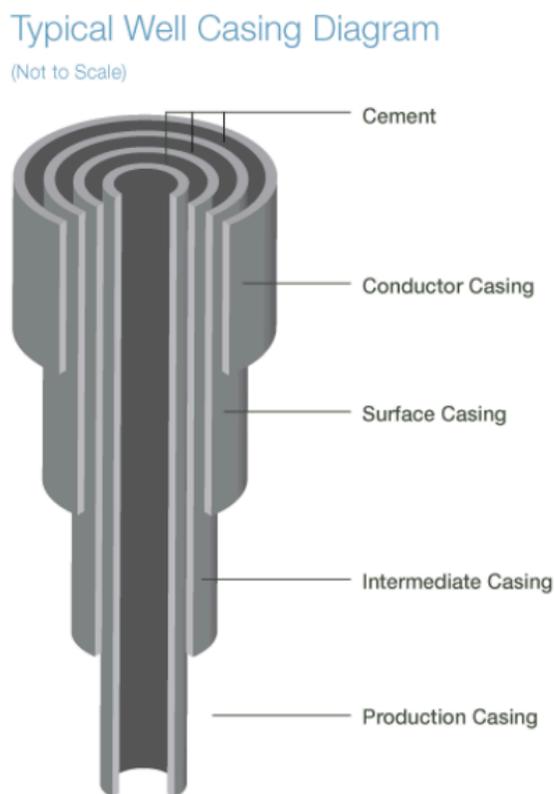
La perforación se inicia con un pozo superficial de una profundidad establecida previamente y que usualmente baja entre 15 y 100 pies por debajo del nivel freático. Se debe prestar especial atención en la prevención de la contaminación de las aguas subterráneas, lo que se consigue aislando los niveles freáticos con el casing y su cementación.

A medida que avanza la perforación, se va colocando la tubería de revestimiento del pozo o casing para revestir las paredes del pozo y, entre otras funciones, evitar que las paredes se derrumben y para aislar las capas acuíferas. Cada tubo tiene unos 12 metros de longitud y su diámetro varía según la profundidad del pozo. Esta operación se conoce como instalación del casing del pozo. Se establece, de esta forma, la siguiente secuencia:

- Perforación
- Introducción de la tubería de revestimiento
- Cementación de la tubería

Las tuberías del casing o de revestimiento son metálicas y deben instalarse a intervalos predefinidos en el proyecto de perforación. Tiene la finalidad de contener, mantener y proteger las paredes del pozo, pero más importante aún es asegurar que no se producen fugas de petróleo o de gas natural a través de ellas mientras asciende a la superficie y prevenir al mismo tiempo la infiltración hacia el interior del pozo de fluidos o gases desde la roca circundante. El casing se diseñará en función de los diámetros de perforación y de las características de las formaciones atravesadas y el régimen de presiones de formación y empujes litostáticos. El casing, una vez instalado es cementado mediante técnicas de cementación.” (Herrera Herbert, 2020, p.86).

Figura 13

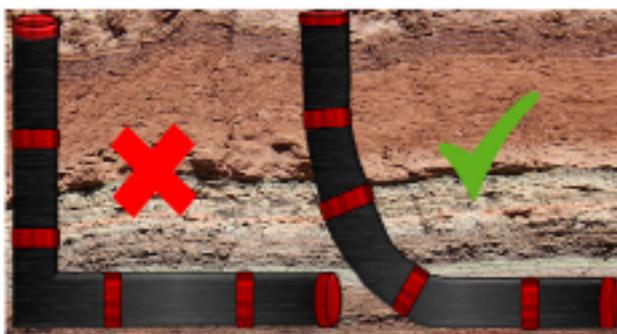


Nota. Diagrama de tuberías del casing.

“Los pozos verticales utilizados para la caracterización del yacimiento se perforan hasta alcanzar la formación de interés en el YNC. Se inicia el pozo de perforación acentuando un revestimiento de superficie cuyo diámetro se encuentra entre 20 y 30 pulgadas. A medida que las etapas del pozo van avanzando, el diámetro del hoyo va disminuyendo por efecto telescópico. Para este tipo de pozos exploratorios se practican diferentes pruebas petrofísicas, geoquímicas, geomecánicas y geológicas, que permitan identificar las propiedades de la roca y, en algunos casos, extraer secciones de roca por corazonamiento.

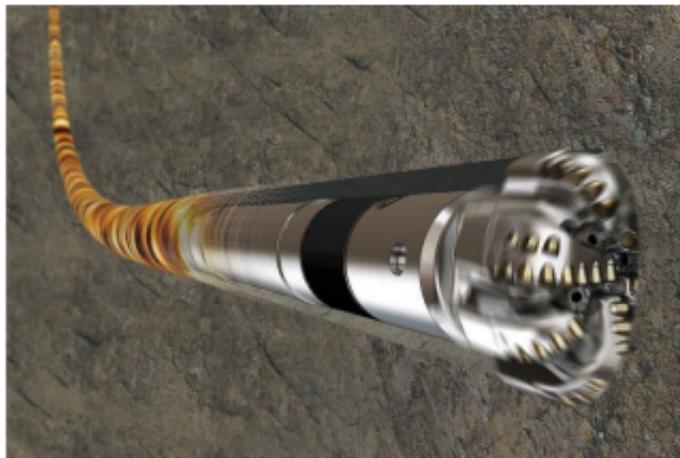
Los pozos horizontales se perforan en general de manera similar, con un cambio significativo cuando el pozo llega a cierta profundidad y deja de ser vertical, para iniciar una construcción angular cuyo objetivo es llegar con la broca a 90° o paralela a la inclinación de la formación. Posteriormente, se continúa perforando de manera horizontal y se evalúa en paralelo las propiedades de la formación de interés mediante registros de pozo. Esta perforación horizontal se realiza con una longitud de entre 800 m y 1500 m lineales. La perforación de pozos horizontales busca aumentar el área de contacto del pozo con la roca de interés.” (ICP, 2022, p.90).

Figura 14



Nota. Esquematación errónea vs real de direccionamiento de pozo.

Figura 15

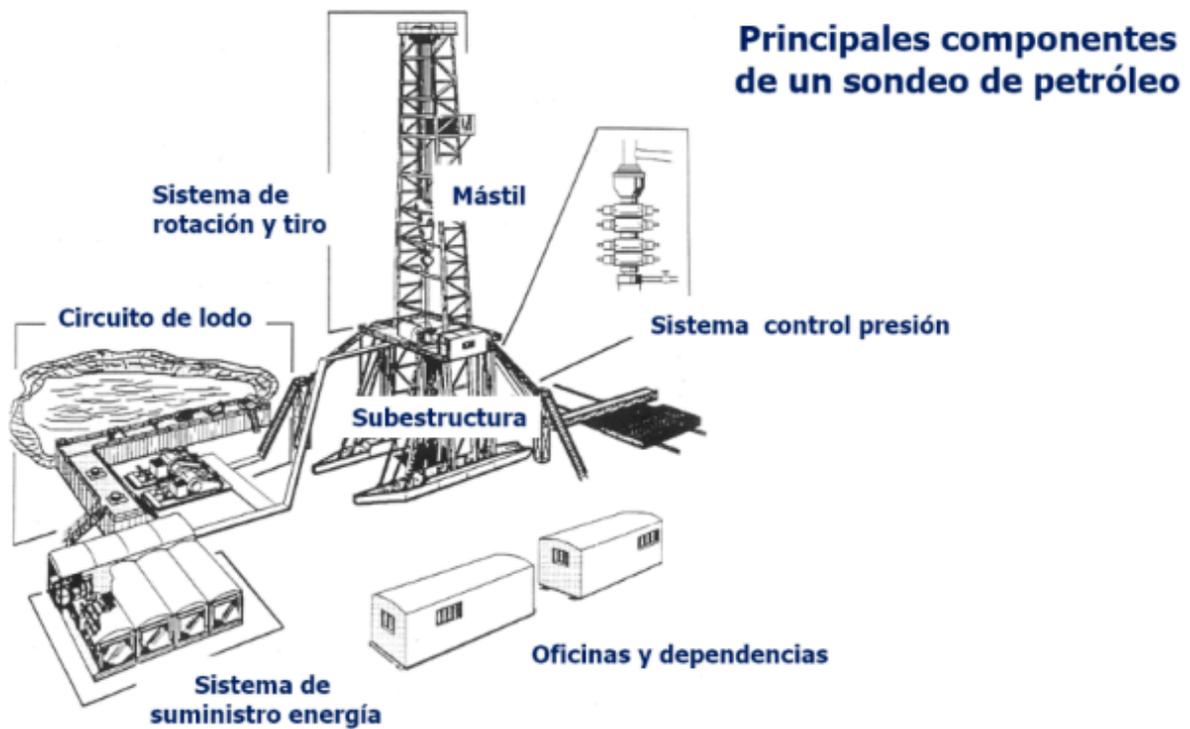


Nota. Escama de perforación horizontal en punta de broca.

Taladro (Rig)

Se muestran en la siguiente imagen los principales componentes de un sondeo de petróleo.

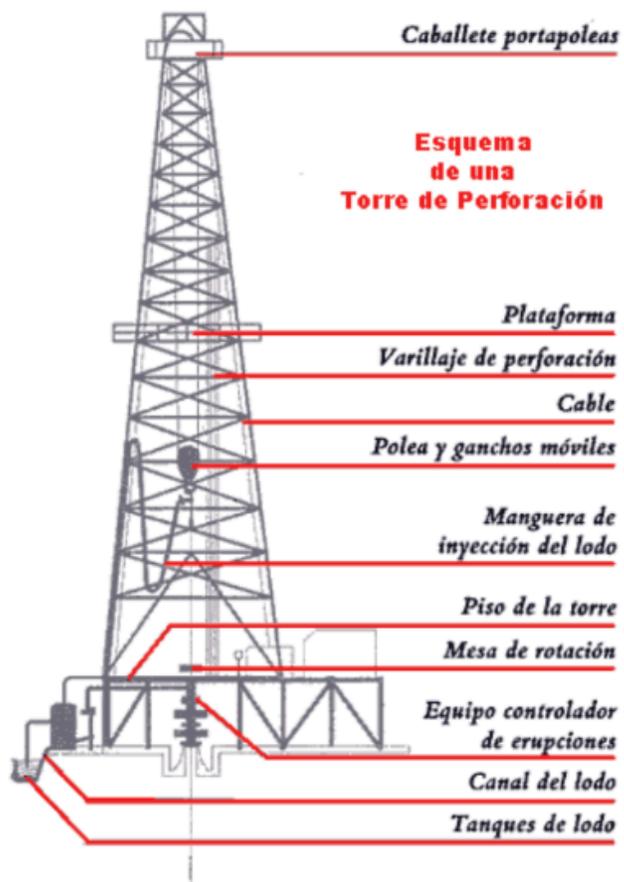
Figura 16



Nota. Componentes de un sondeo de petróleo.

En la siguiente figura se pueden apreciar los componentes de una torre de perforación.

Figura 17



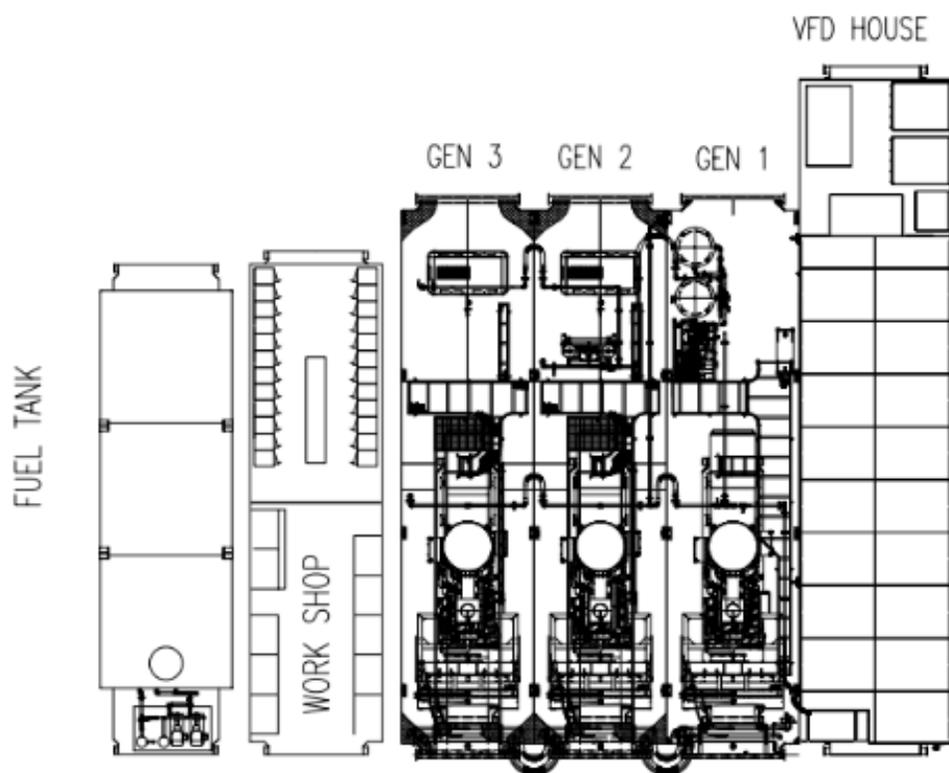
Nota. Esquema de una torre de perforación.

Introducción

Situación Actual

En la actualidad, en los pozos shale típicos de la formación Vaca Muerta, el suministro eléctrico del equipo de perforación se realiza predominantemente mediante grupos generadores diésel. Para un taladro típico, como el modelo 8586 de National Oilwell Varco (NOV), se requieren, por lo general, cuatro motores diésel de 2500 [HP] cada uno, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18



Nota. Layout del taladro

El cuarto generador se utiliza de backup, por si alguno de los otros tres generadores sufre alguna falla y tiene que salir de servicio.

La principal razón por la que se busca reemplazar los motores diésel es por el elevado impacto ambiental que producen.

“Las emisiones de motores diésel son una mezcla compleja de sustancias en forma gaseosa y de partículas, que se produce durante la combustión del combustible diésel. La tasa de emisión y la composición exacta de las emisiones diésel dependen, entre otros, del tipo, la antigüedad, el estado operativo y el mantenimiento del motor, de la composición y propiedades físicas del combustible, y del tratamiento posterior de los humos emitidos. Los componentes principales de la fase gaseosa de las emisiones diésel son nitrógeno, dióxido de carbono (CO₂), oxígeno, vapor de agua, óxidos de nitrógeno (NOX) y monóxido de carbono (CO). De hecho, estos gases cubren más del 99% de la masa total de las emisiones diésel. Además, también pueden emitirse en la fase gaseosa, pequeñas cantidades de dióxido de azufre (SO₂) y varios compuestos orgánicos, como carbonilos de bajo peso molecular, ácidos carboxílicos, alcanos, alquenos y compuestos aromáticos.” (Emisiones de motores diésel, 2023, p.1).

Una alternativa, y la que se desarrolla en este trabajo, consiste en sustituir los grupos electrógenos diésel por alimentación eléctrica proveniente de la red de media tensión disponible en Vaca Muerta. Para ello, en primer término se analiza el comportamiento de la carga, es decir, del taladro de perforación.

Análisis de la carga

Para dimensionar adecuadamente los equipos requeridos para la transición energética, es imprescindible caracterizar el comportamiento eléctrico del taladro. Con este fin, se analizaron mediciones suministradas por dos operadoras que desarrollan actividades en Vaca

Muerta. Cabe señalar que el taladro opera a una tensión nominal de 600 [V] y una frecuencia nominal de 60 [Hz].

En primera instancia, se estudian los datos provistos por la primera operadora. Esta empresa registró corriente y potencia en intervalos de cinco minutos durante un mes continuo de operación (31 días) en un pozo de shale representativo de la formación. A partir de dichas series temporales se derivaron parámetros adicionales de alto interés, como la energía consumida y el factor de potencia, empleando las ecuaciones correspondientes.

- Factor de potencia:

$$FP = \frac{P [W]}{\sqrt{3} * U_N [V] * I [A]} \quad (1)$$

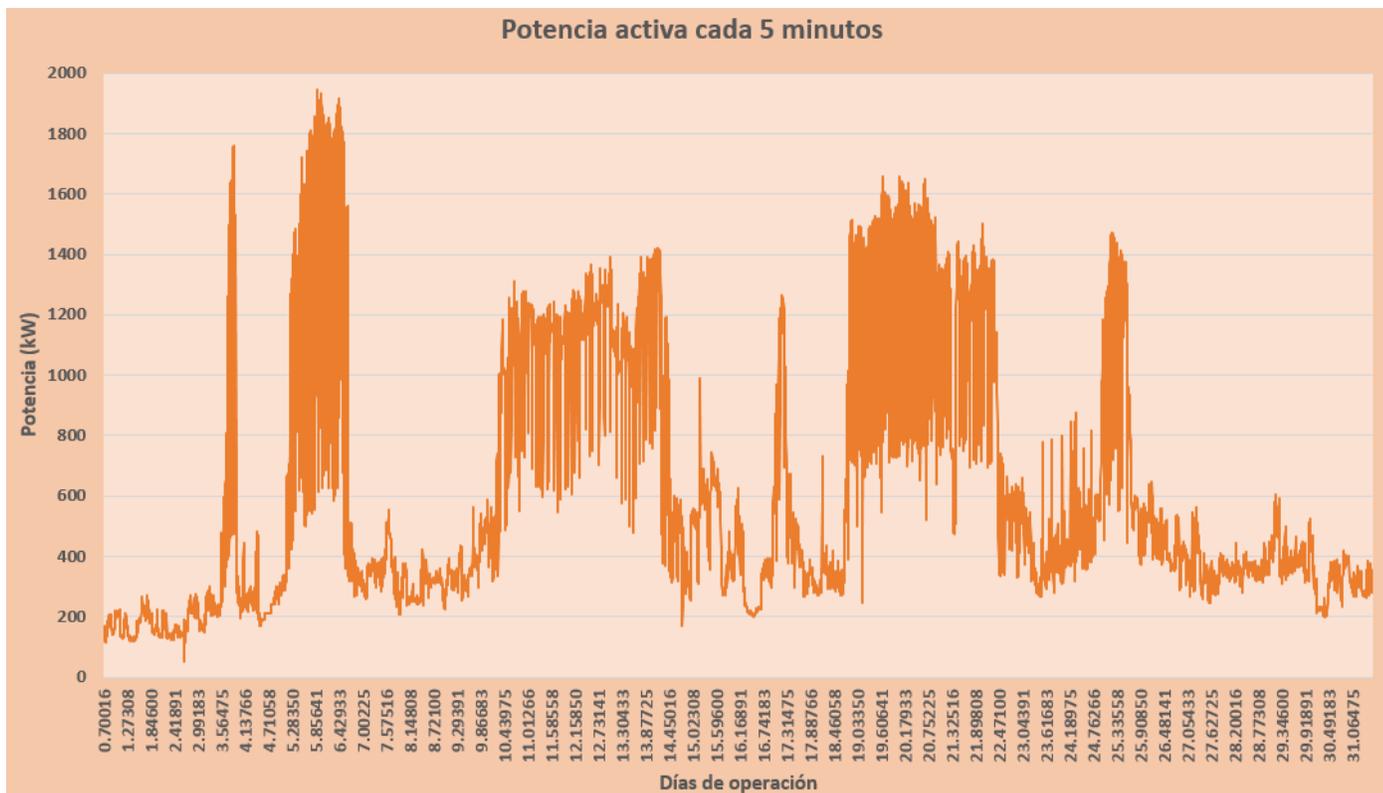
- Energía consumida:

$$E [kWh] = P [kW] * t [h] \quad (2)$$

Siendo t los intervalos de 5 minutos en los que se realizaron las mediciones, entonces, $t = 5 [min] = 0,08333 [h]$.

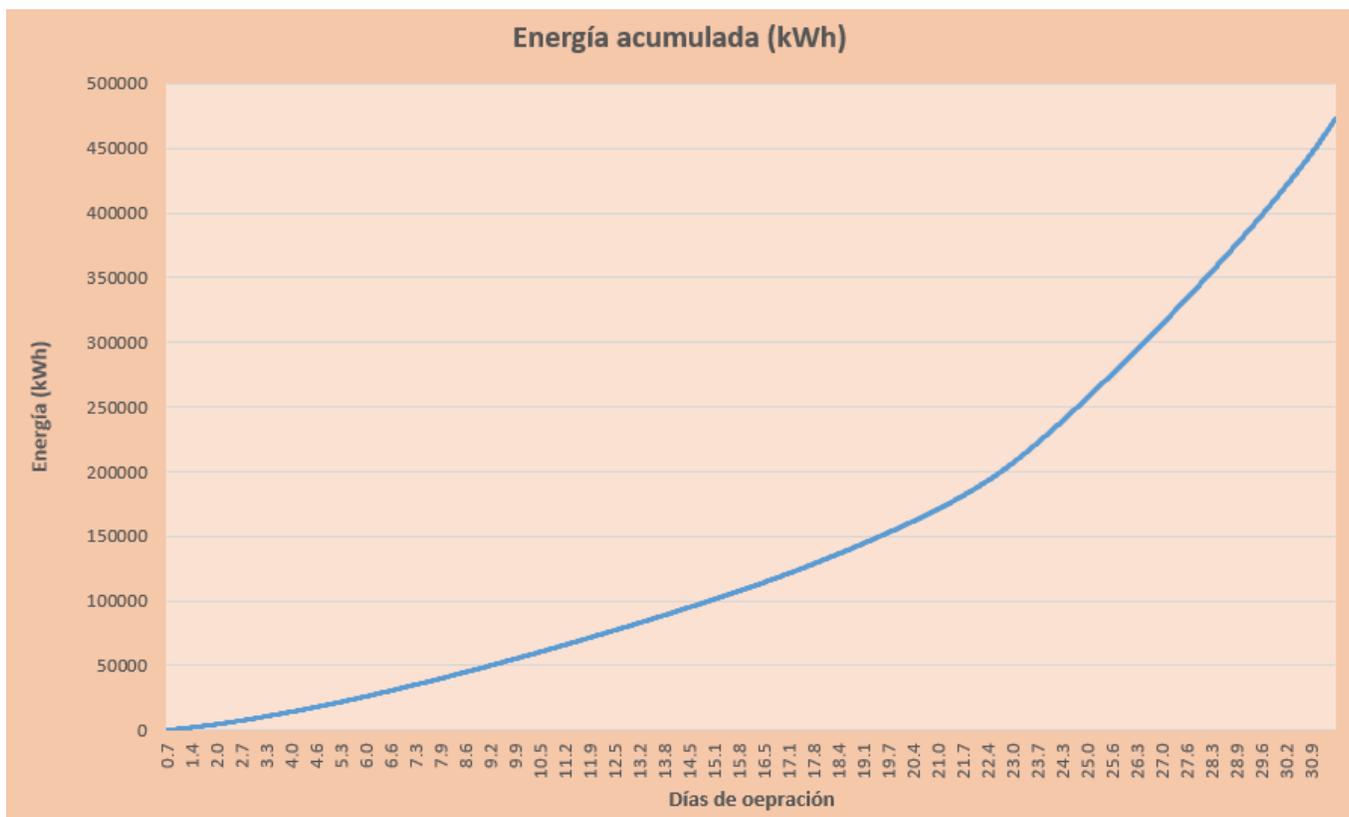
Se procedieron a realizar distintos gráficos para poder observar el comportamiento del taladro durante la perforación del pozo. En primer lugar, se graficaron la potencia y la energía acumulada en función del tiempo:

Figura 19



Nota. Potencia cada 5 minutos en un período de 31 días.

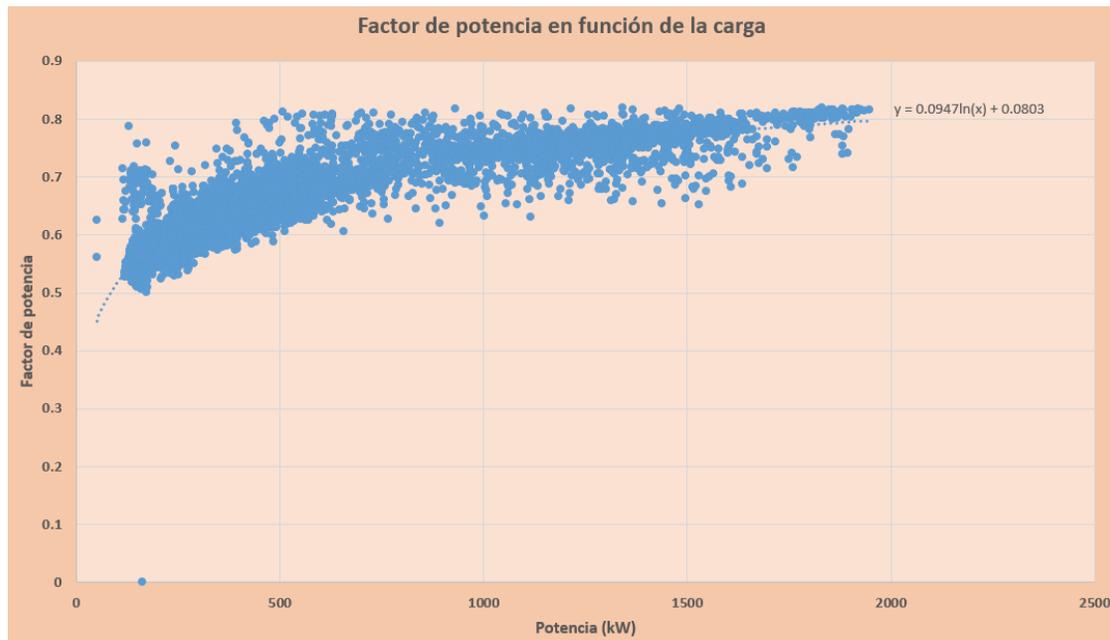
Figura 20



Nota. Energía acumulada en función del tiempo.

Luego, se graficó el factor de potencia en función de la potencia:

Figura 21



Nota. Factor de potencia en función de la potencia (carga).

Los resultados relevantes que se obtuvieron se ven reflejados en las siguientes tablas:

Tabla 1

Potencia	
Potencia promedio (kW)	638.834
Potencia máxima (kW)	1947.81
Factor de potencia máximo (%)	82.03
Factor de potencia promedio (%)	66.98

Nota. Datos de potencia y factor de potencia del taladro.

Tabla 2

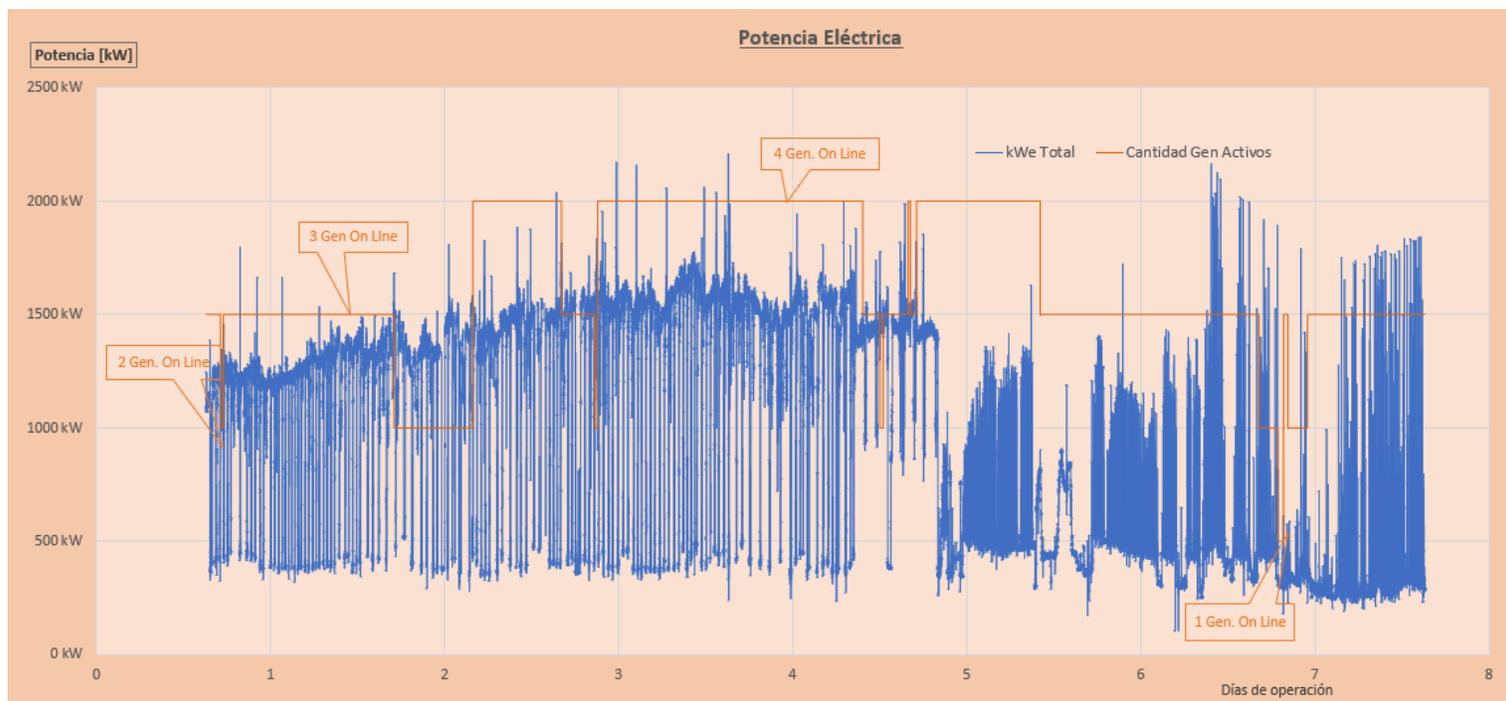
Energía		
Energía total (kWh)	472897	
Días totales de operación	30.84	
Horas de operación	740.17	
Energía consumida por día	kWh/día	MWh/día
	15333.75	15.33375

Nota. Datos de energía y tiempo de operación del taladro.

El principal problema de este primer conjunto de datos radica en la resolución temporal: al registrarse mediciones cada cinco minutos, se pierde información relevante entre muestras consecutivas. Dado el carácter altamente variable de la carga, es probable que no se haya capturado el verdadero pico de potencia, el cual pudo ocurrir en cualquier instante dentro de los intervalos de muestreo.

En una segunda etapa, se analizan los registros suministrados por la segunda empresa operadora. A diferencia del caso anterior, el muestreo se realizó cada 10 segundos, lo que permite observar con mayor fidelidad el comportamiento del taladro. En este caso, se midió únicamente la potencia entregada por cada grupo generador. Con esta información, se grafica la potencia total demandada por la carga en función del tiempo (días de operación), indicando explícitamente la cantidad de generadores en servicio en cada momento.

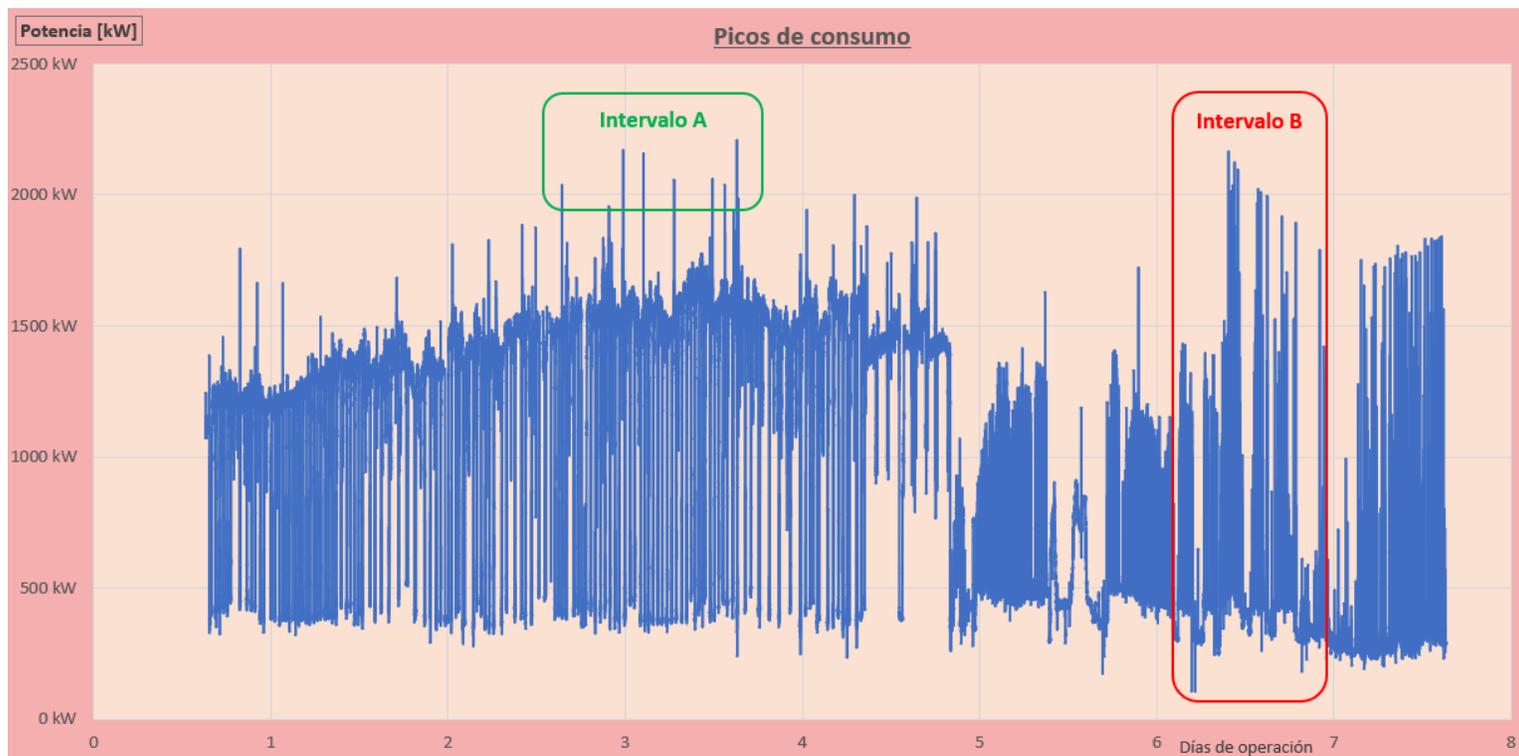
Figura 22



Nota. Curva de la potencia consumida por la carga en función de los días de operación.

Para poder determinar la máxima potencia que se debe suministrar, se deben analizar los picos de demanda. Como estos picos se producen en distintos momentos, se procede a analizar dos intervalos diferentes, como se observa en la siguiente figura:

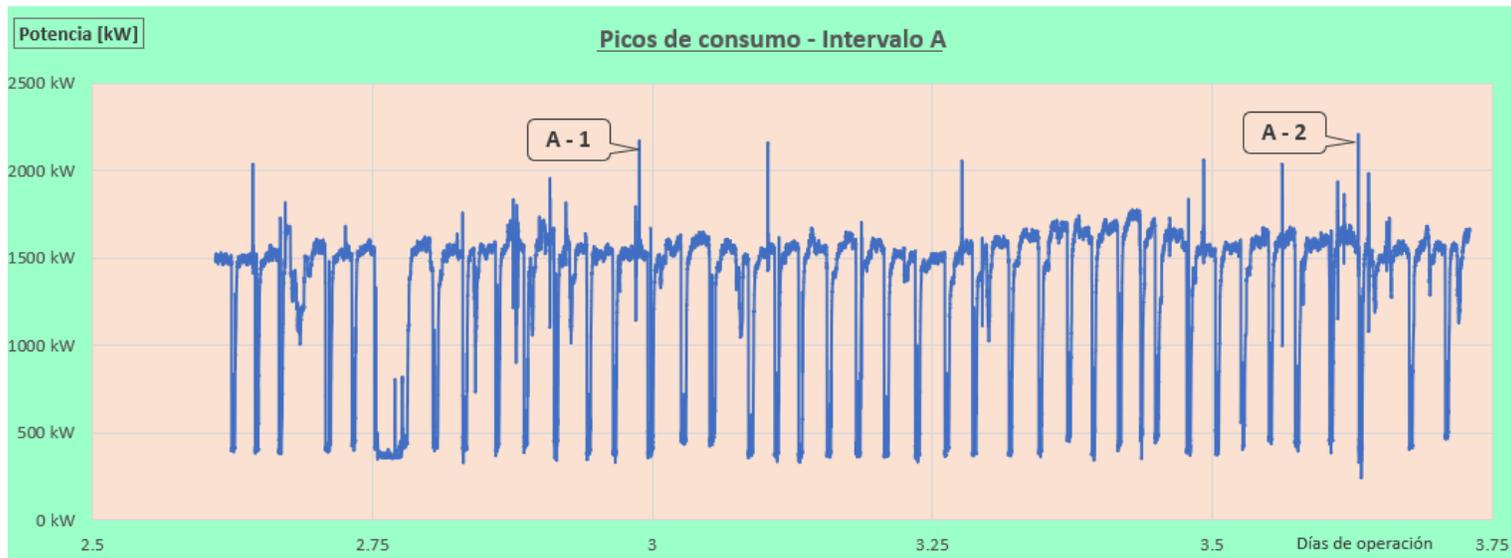
Figura 23



Nota. Intervalos de análisis.

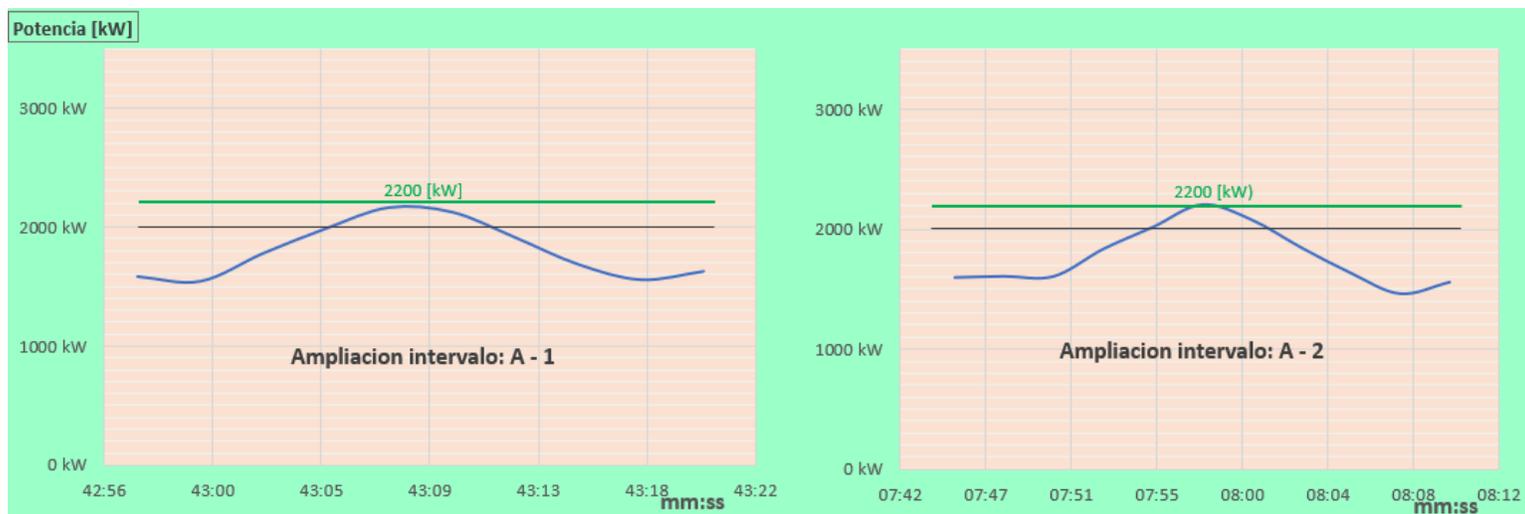
En primer lugar, se analiza el intervalo A:

Figura 24



Nota. Análisis del intervalo A.

Figura 25

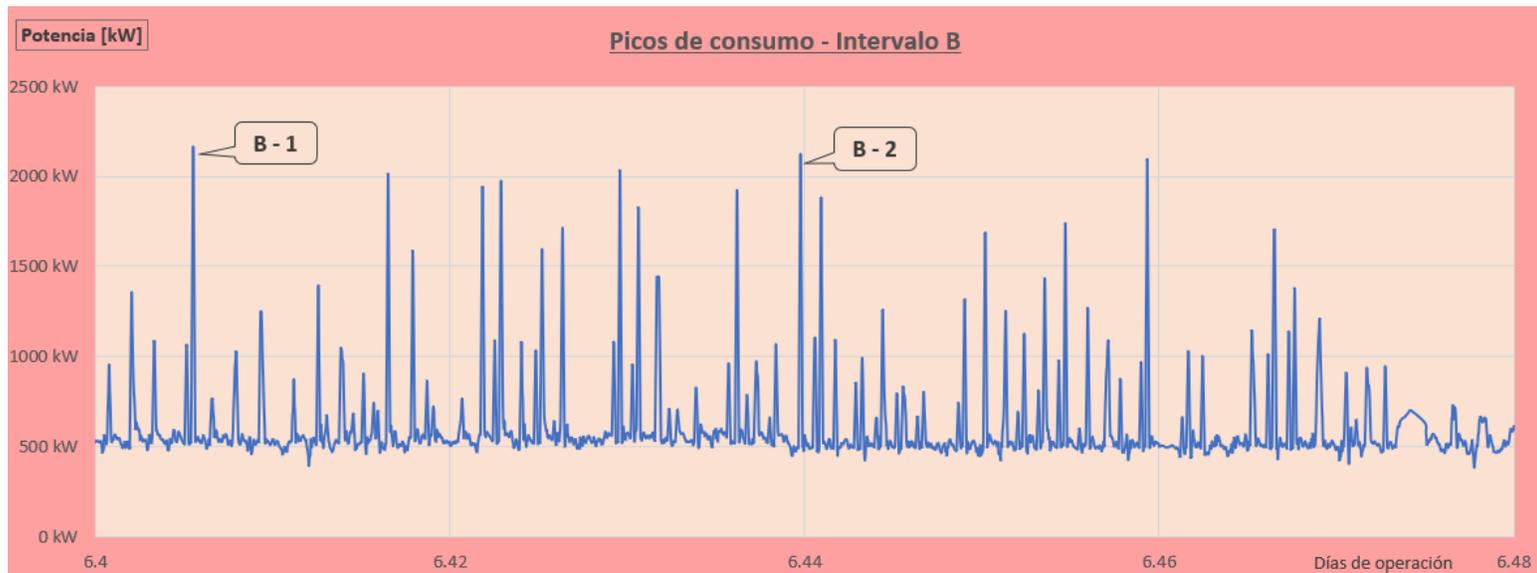


Nota. Ampliación del intervalo en dos subintervalos.

Se observa que el pico de potencia es de 2200 [kW] y dura en ambos casos menos de 10 segundos.

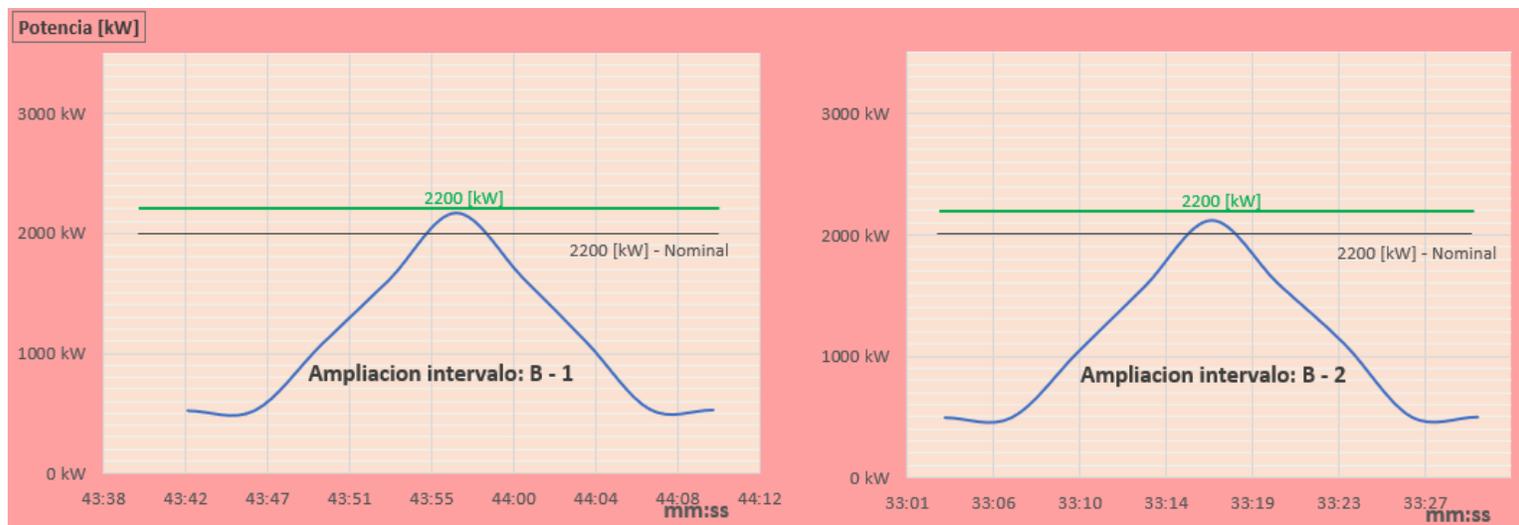
Luego, se procede a analizar el intervalo B:

Figura 26



Nota. Análisis del intervalo B.

Figura 27



Nota. Ampliación del intervalo en dos subintervalos.

En este caso puede apreciarse que el pico de potencia no alcanza los $2200 \text{ [kW]} = 2,2 \text{ [MW]}$ y la duración del mismo es de aproximadamente cinco segundos.

Se concluye entonces que la potencia máxima del taladro equivale a 2200 [kW] y que dicha demanda se sostiene durante aproximadamente 10 segundos. Esta información resulta crítica para el dimensionamiento de los equipos.

Desarrollo

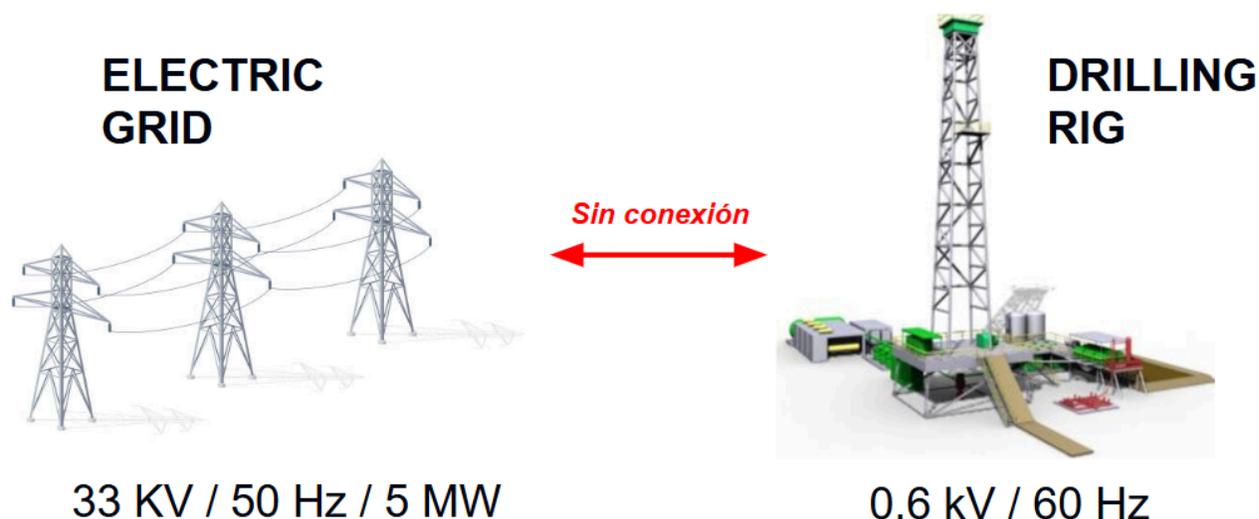
Solución propuesta

Como se mencionó previamente, en el contexto actual, todas las empresas relacionadas con la extracción de hidrocarburos están buscando reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y por eso se encuentran inmersas en un período de transición energética, desde el diésel hacia el gas o la electricidad. Si bien estas alternativas de energía no son renovables o “limpias”, tienen un impacto menor en el medioambiente que el diésel, y funcionan como un paso intermedio para llegar en un futuro a la utilización de energías 100 % renovables.

En este trabajo se va a analizar la viabilidad de reemplazar los motores diésel por la energía eléctrica de la red de media tensión en Vaca Muerta, con todas las ventajas que esto conlleva.

El principal problema radica en que el taladro funciona con 600 [V] y 60 [Hz], mientras que la red eléctrica es de 33 [kV] y 50 [Hz]. Por ende, se van a necesitar distintos equipos para poder convertir la tensión y la frecuencia de la red a la requerida por el taladro.

Figura 28



Nota. Esquema de la solución propuesta.

El segundo inconveniente identificado radica en que los pozos proyectados no se encuentran equidistantes de la red eléctrica, lo que requiere el desarrollo de una solución flexible que permita abastecer la mayor cantidad posible de ubicaciones dentro del yacimiento. Como criterio práctico, se considera que la distancia entre los pozos y la red de media tensión varía entre 100 y 300 metros.

Se evaluarán distintas alternativas. Para cada una, se dimensionarán todos los equipos necesarios para llevar la energía desde la red hasta el taladro, asegurando la tensión y la frecuencia requeridas.

Alternativa 1

Como se mencionó previamente, se busca diseñar una solución flexible, y para ello se propone el desarrollo de dos equipos móviles: un *genset* y una estación transformadora. El término *genset* es la abreviatura de *generator set* (grupo generador), que se refiere a una combinación de generador y motor. “Un grupo electrógeno se define como un motor que

impulsa el generador, el cual proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de otros equipos. Cada grupo electrógeno consta de dos componentes principales: el generador (o alternador) y el motor. El motor impulsa el generador, que a su vez proporciona electricidad para alimentar otros equipos, y debido a su funcionamiento en lugares remotos y a las posibles condiciones adversas, los grupos electrógenos deben tener una construcción robusta que resista las inclemencias del tiempo.” (Klinge Corporation, s.f.)

“Por su parte, las estaciones transformadoras móviles se diseñan para cubrir emergencias o aplicaciones particulares, y todos sus aspectos constructivos responden a la intención de conformar un producto final liviano, sin perder calidad en las prestaciones. Las estaciones transformadoras móviles se proveen montadas sobre un módulo de transporte. Con tensiones de hasta 138 [kV] y 20 [MVA] de potencia, es posible construirlas sobre módulos de transporte capaces de circular libremente por las rutas nacionales. Las ventajas de su utilización son las siguientes:

- Responder a demandas estacionales de carga a bajo costo.
- Disminuir los costos de mantenimiento en las estaciones transformadoras tradicionales.
- El suministro de energía temporario permite reducir los cortes de energía por mantenimiento a cero, con la ventaja adicional de realizar sin tensión todas las tareas de mantenimiento sobre el transformador y equipos asociados.
- Rápida provisión de energía para casos extraordinarios, como catástrofes o inundaciones.
- Provisión de energía en tiempo y forma para grandes obradores.”

Figura 29

Nota. Estación transformadora móvil marca Tadeo Czerweny.

(Tadeo Czerweny, s.f.)

La propuesta consiste en posicionar la estación transformadora móvil en las inmediaciones de la red eléctrica de media tensión, mientras que el grupo electrógeno (*genset*) se ubica directamente junto al equipo de perforación (a una distancia despreciable). Para posibilitar la conexión entre estos equipos móviles, se prevé el uso de un cable de 300 metros de longitud, correspondiente a la distancia máxima respecto de la red, montado sobre un carretel dispuesto en la estación transformadora, tal como se muestra en la Figura 29.

A continuación, se presenta el dimensionamiento de los distintos equipos requeridos para el sistema.

Dimensionamiento de equipos

Se procede al dimensionamiento de los componentes principales del sistema siguiendo una secuencia ascendente, desde el punto de consumo (aguas abajo) hasta la conexión con la red de media tensión (aguas arriba).

Alternador

En primer lugar, es fundamental disponer de un equipo capaz de generar los 600 [V] y 60 [Hz] requeridos por el taladro. Para ello, se debe instalar un generador sincrónico con dichas especificaciones, asegurando que pueda suministrar la potencia necesaria para satisfacer la demanda de la carga.

“Hay ciertos límites básicos para la velocidad y potencia que se pueden obtener de un generador síncrono. Estos límites se llaman valores nominales de la máquina. El propósito de los valores nominales es proteger al generador del daño que pudiera ocasionar una operación inadecuada. Con este fin, cada máquina tiene ciertos valores nominales que se muestran en su placa de características.

Los valores nominales comunes de una máquina síncrona son el voltaje, la frecuencia, la velocidad, la potencia aparente, el factor de potencia, la corriente de campo y el factor de servicio. Una vez que se conoce la frecuencia de operación, hay sólo una velocidad de rotación posible para cierto número de polos. La relación fija entre la frecuencia y la velocidad está dada por la siguiente ecuación:” (Chapman, 2012, p.210).

$$f_e = \frac{n_m * P}{120} \quad (3)$$

$$n_m = \frac{f_e * 120}{P} \quad (4)$$

Siendo:

- n_m : velocidad nominal de rotación del motor
- P : cantidad de polos

- f_e : frecuencia nominal de operación

Si se utiliza un generador de cuatro polos, la velocidad nominal resulta:

$$n_m = \frac{60 [Hz] * 120}{4 [polos]} = 1800 [rpm] \quad (5)$$

Por otro lado, como se observó en el análisis de la carga, la misma varía constantemente con picos de 2200 [kW], por lo que se debe verificar que el generador sea capaz de soportar dicha potencia.

Con todas estas condiciones, se seleccionó un generador sincrónico de la marca WEG, modelo GPA. Son alternadores que ofrecen versatilidad y confiabilidad para aplicaciones rigurosas. Los alternadores G Special son equipos cerrados y robustos, diseñados para operar en ambientes severos o en presencia de impurezas y polvo, típicos en aplicaciones de *Oil & Gas*.

Figura 30



Nota. Alternador sincrónico GPA de la marca WEG.

A continuación se adjunta un fragmento de la hoja de datos del equipo, con las principales características del mismo:

Figura 31

Frame	: 500	Mounting	: B20E				
Output	: 2500 kVA	Protection Degree	: IP23W				
Rated voltage	: 600 V	Cooling	: IC01				
Stator Connection	: Y	Approx. weight	: 6700 kg				
Rated current	: 2406 A	Rotor Inertia (J=GD ² /4)	: 55 kgm ²				
Poles	: 4	Overload	: 1.10 x I _n per 1 h each 6H				
Frequency	: 60 Hz	Momentary Overload	: 1.5 x I _n per 30 s				
Rated speed	: 1800 rpm	Short circuit current (rms)	: 36072 A				
Duty cycle	: S1	Asym. short circuit current (peak)	: 91824.3 A				
Power factor	: 0.8	Harmonic distortion (phase-phase)	: 5 %				
Excitation	: BRUSHLESS PMG	Noise level	: 101 dB(A) (+3 dB(A))				
Damper winding	: YES	Vibration	: A 2.3 mm/s rms				
Stator insulation class	: H	Overspeed	: 1.2 x n per 120 s				
Stator temperature rise	: class B	Coupling	: Direct				
Service factor	: 1.00	Driver Machine	: Diesel engine				
Rotor insulation class	: H	Direction of rotation ¹	: Clockwise				
Rotor temperature rise	: class B						
Ambient temperature	: 40 °C						
Altitude	: 1000 m						
Load	0%	50%	75%	100%			
Power factor	-	1	0.8	1	0.8		
Efficiency (%)	-	95.9	94.7	96.6	95.6	96.7	96.0

Nota. Hoja de datos del generador sincrónico GPA de la marca WEG.

Se observa que la potencia aparente nominal es de 2500 [kVA], con un factor de potencia nominal de 0,8, mientras que el peso aproximado del mismo es de 6700 [kg]. Se determina la potencia activa nominal:

$$P_n [kW] = S_n [kVA] * FP = 2500 [kVA] * 0,8 = 2000 [kW] \quad (6)$$

Como se demostró anteriormente, la carga no suele superar los 2000 [kW] salvo por algunos picos que pueden llegar a los 2200 [kW]. Como se observa en la Figura 31, el generador soporta sobrecargas de 1,1 veces la potencia nominal por una hora, cada seis horas, es decir:

$$P_{sc} [kW] = P_n [kW] * 1,10 = 2000 [kW] * 1,10 = 2200 [kW] \quad (7)$$

Como los picos de potencia tienen una duración máxima de 10 segundos, el generador va a poder soportarlos sin inconvenientes.

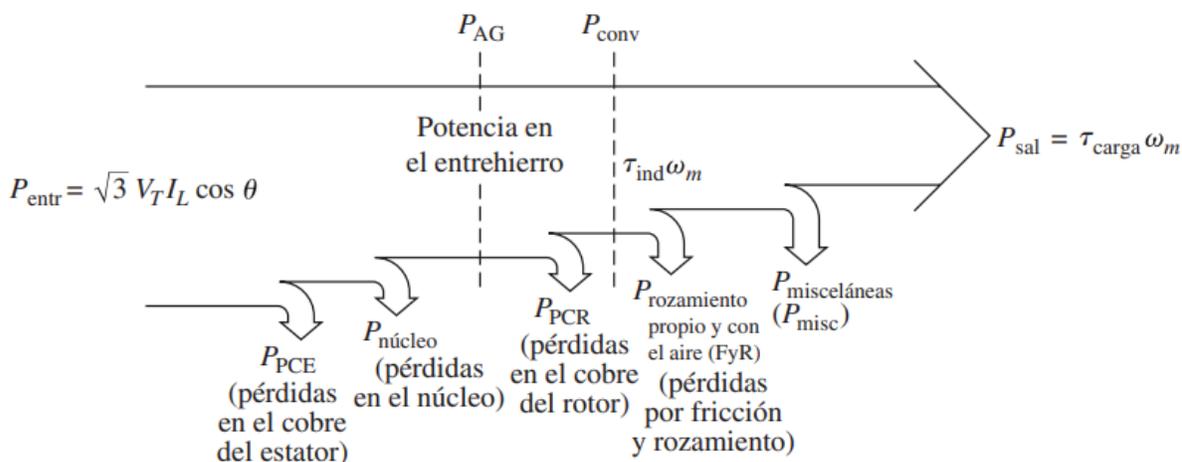
“Un generador síncrono es una máquina síncrona que se utiliza como generador. Convierte potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de la potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica u otro equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe tener la propiedad básica de mantener su velocidad constante sin importar la demanda de potencia. Si esto no se cumple, entonces la frecuencia resultante del sistema de potencia podría presentar fallas (variar).” (Chapman, 2012, p.157).

En este caso, como la alimentación proviene de la red eléctrica, se debe colocar un motor eléctrico trifásico.

Motor asincrónico

Se ha decidido emplear un motor de inducción trifásico con rotor de jaula de ardilla. Es fundamental verificar que dicho motor sea capaz de suministrar la potencia requerida por el generador síncrono. La potencia nominal del motor debe superar los 2200 [kW], valor correspondiente a la potencia pico de la carga, considerando que el motor presenta pérdidas inherentes a su funcionamiento. En consecuencia, la potencia de salida será inferior a la potencia de entrada. A continuación, se presenta un diagrama de flujo de potencia que ilustra la relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica entregada por el motor.

Figura 32



Nota. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción.

Por otro lado, al estar acoplado al generador debe girar también a 1800 [rpm] (algo menor debido al deslizamiento del motor).

A partir de estas condiciones, se seleccionó un motor trifásico de inducción de la marca WEG, modelo W60.

Figura 33



Nota. Motor de inducción trifásico W60 de la marca WEG.

A continuación se adjunta un fragmento de la hoja de datos del equipo, con las principales características del mismo:

Figura 34

Frame	: 500	Service factor	: 1.00
Output	: 2700 kW	Moment of inertia (J)	: 48.0 kgm ²
Poles	: 4	Locked rotor time	: Not applicable
Frequency	: 60.0 Hz	Temperature rise ³	: Class B
Rated voltage	: 6600 V Connection: Y	Duty cycle	: S1
Rated current	: 280.7 A	Ambient temperature	: 0 °C up to 40 °C
Rotor voltage	: Not applicable	Altitude	: 1000 m
Rotor current	: Not applicable	Protection degree	: IP23
L. R. Amperes	: Not applicable	Cooling method	: IC01
LRC	: Not applicable	Mounting	: B3R
No load current	: 81.4 A	Rotation ¹	: Clockwise
Rated speed	: 1785 rpm	Noise level ²	: 89 dB(A)
Slip	: 0.83 %	Vibration	: A 2.3 mm/s rms
Rated torque	: 14445 Nm	Starting method	: Frequency inverter
Locked rotor torque	: Not applicable	Coupling	: Direct
Pull up torque	: Not applicable		
Breakdown torque	: 240 %		
Insulation class	: F		
Output	50%	75%	100%
Efficiency (%)	96.50	96.80	96.70
Power factor	0.75	0.83	0.87
		Load type	: Not informed
		Load torque	:
		Load inertia (J=GD ² /4)	:

Nota. Hoja de datos del motor de inducción W60.

Se observa que la potencia activa nominal es de 2700 [kW], mientras que la tensión nominal es de 6,6 [kV]. El peso aproximado del motor es de 6121 [kg].

Variador de frecuencia

Como se mencionó previamente, la máquina primaria que impulsa al generador debe mantener su velocidad constante para evitar variaciones en la frecuencia del mismo. El motor de inducción no puede mantener una velocidad constante sin algún tipo de regulación externa, ya que su velocidad depende de la frecuencia de alimentación y de la carga mecánica. Al variar la carga, se producirá una variación en la velocidad del eje del motor asíncrono, la cual se busca mantener constante. Entonces, la función del variador será ajustar la relación tensión-frecuencia (V/F) con el objetivo de mantener una velocidad de salida de 1800 [rpm].

Para lograr el funcionamiento del eje a 1800 [rpm] bajo carga (inicialmente considerada como la nominal), y dado que la tensión de alimentación del motor no puede exceder su valor nominal, éste sólo podrá suministrar una potencia inferior a la nominal. Por lo tanto, la variable a controlar será la velocidad del eje. Para mantenerlo en 1800 [rpm], la frecuencia de salida del variador deberá ser superior a 60 [Hz], mientras que la tensión de salida se mantendrá en su valor nominal. Como consecuencia, el motor no podrá proporcionar su potencia nominal, sino una inferior.

La selección de un variador de frecuencia no es sencilla, ya que no sólo depende de la potencia o la corriente nominal del motor que se quiere controlar, sino que también depende del tipo de carga. Se requiere de un variador de frecuencia para un motor de las siguientes características:

- $P_n = 2700 [kW]$
- $U_n = 6,6 [kV]$
- $I_n = 280,7 [A]$
- $f_n = 60 [Hz]$

De acuerdo con el fabricante WEG, para un motor con las características mencionadas, y considerando que la aplicación corresponde a un equipo de perforación (carga dinámica), el variador de frecuencia más adecuado es el modelo MVW 3000. El MVW 3000 es un convertidor de frecuencia destinado al control de motores de media tensión en los valores nominales de 1,15 [kV] a 13,8 [kV] y para un rango de potencia de 85 [HP] a 16215 [HP]. Basado en una topología de células de baja tensión (< 1000 [V]) conectadas en serie para formar cada fase del convertidor, su montaje modular permite diferentes configuraciones, en caso de que sea necesario, accionar motores de potencias elevadas.

Figura 35



Nota. Variador de frecuencia MVW 3000.

Las características principales del equipo se enumeran a continuación:

- Rectificador de entrada a diodos: 36 pulsos
- Tensión de alimentación: 18 x 690 [V] (6600 [V])
- Frecuencia de alimentación: 50 [Hz]
- Frecuencia de salida: 0...100 [Hz]
- Temperatura de operación: 0 a 40°C
- Máxima altitud: 1000 [m]
- Tipo de control: Escalar V/F
- Corriente nominal de salida: 310 [A]
- Factor de potencia: 0,95
- Eficiencia (transformador y convertidor): 0,96

- Peso aproximado: 12000 [kg]

A continuación se muestra un diseño representativo del variador de frecuencia:

Figura 36



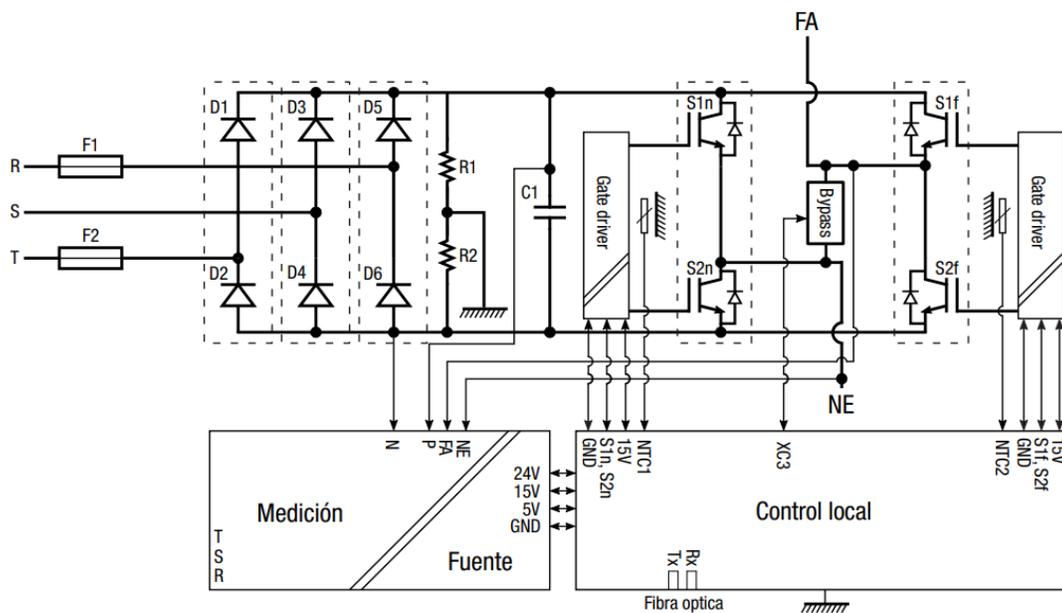
Nota. Diseño representativo del MVW 3000.

“El MVW 3000 cuenta con un transformador de entrada, ya que la topología de células en cascada exige que la alimentación de cada célula sea aislada entre sí. Este transformador está construido de forma de atender diversas funciones para el MVW 3000, como el aislamiento necesario para las células de potencia, cancelación de armónicos de corriente proveniente de los rectificadores de entrada de las células y también tiene un devanado auxiliar, responsable por la precarga del sistema.

Por otro lado, las células de potencia empleadas en los brazos del MVW 3000, son convertidores monofásicos de baja tensión (tensión de salida de 690 o 710 [Vrms]), en una topología conocida como puente H o puente completo. En la Figura 32 puede ser observado un esquema básico del circuito de la célula de potencia. Cada célula cuenta con la alimentación de

un secundario propio (trifásico) del transformador principal, que garantiza el aislamiento de media tensión del convertidor. Las tensiones trifásicas de la entrada de los módulos son entonces rectificadas por un puente de Graetz utilizando dispositivos semiconductores no controlados (diodos), formando un bus CC (corriente continua) propio con la adición de los condensadores a la célula (representados por el símbolo C1). Son utilizados dispositivos semiconductores controlados del tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) para implementar el puente inversor en H, de esa forma, cada célula de potencia cuenta con cuatro IGBTs en la configuración presentada arriba.” (WEG, 2022, p.27).

Figura 37



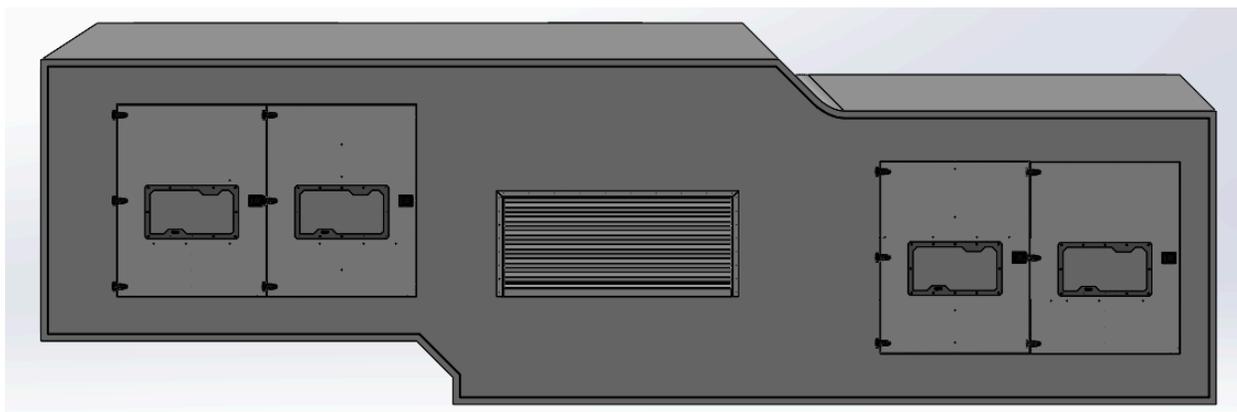
Nota. Esquema básico de una célula de potencia.

El fabricante asegura bajos niveles de THD tensión/corriente en la entrada/salida lo que permite cumplir al 100% con la normativa IEEE-519 y ser aplicado en accionamientos de motores estándares sin la necesidad de bobinas reforzadas.

Por último, el fabricante advierte que el variador debe estar instalado en una sala adecuada, con temperatura controlada, libre de polvo, humedad, gases corrosivos o sulfúricos o partículas conductoras.

Se presenta un diseño preliminar de una sala destinada a alojar el variador de frecuencia, el alternador y el motor. Su propósito es mantener una temperatura interna controlada, mediante aberturas y un sistema de ventilación, y evitar el ingreso de polvo, humedad, gases corrosivos y partículas conductoras que puedan afectar a los equipos. Se incorporan puertas de acceso con aislamiento térmico para facilitar las tareas de mantenimiento e inspección. Dadas las condiciones del sitio de instalación, se propone ejecutar la envolvente en acero inoxidable.

Figura 38



Nota. Sala de alojamiento de los equipos.

El peso aproximado de la cabina, obtenido mediante el software *SolidWorks*, es de 4000 [kg]. Para tener en cuenta las puertas, persianas, soportes y herrajes, se incrementa el peso de la sala en un 15%. Finalmente, el peso de la sala completa se estima en 4600 [kg].

Carretel

El diseño del carretel se realiza mediante un proceso iterativo, a la par de la selección del cable que conecta el transformador con el variador de frecuencia. En principio, se pueden establecer algunos límites para el diseño. En cuanto al diámetro mínimo del tambor, sabiendo el radio de curvatura del cable seleccionado, se puede determinar dicho diámetro para que el cable pueda ser enrollado sobre él. Según el fabricante de cables Cimet, el radio de curvatura (ρ_c) de un cable tripolar de media tensión se puede calcular como 15 veces el diámetro exterior del mismo (D_c). Por otro lado, se deben tener en cuenta las dimensiones máximas del tráiler sobre el que va a ir montado el carretel. En Argentina, las medidas máximas para los trailers (acoplados y semirremolques) que circulan por rutas nacionales están reguladas por la Ley Nacional de Tránsito N.º 24.449 y sus reglamentaciones, especialmente la Disposición N.º 26/2009 de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) y la Resolución 464/2015. El ancho máximo es de 2,6 [m], mientras que la altura máxima es de 4,3 [m]. Teniendo en cuenta los neumáticos y el chasis del trailer, se limita el diámetro máximo del carretel a 2,5 [m] para no superar la altura máxima (se deben tener en cuenta también los apoyos del carretel). Luego, las dimensiones límites del carretel son las siguientes:

- Diámetro mínimo: $2 * \rho_c = 2 * 15 * D_c = 30 * D_c$
- Diámetro máximo: 2,5 [m]
- Ancho máximo: 2,6 [m]

A partir de estos datos, se puede empezar a iterar. En primer lugar, se debe determinar la cantidad de espiras que entran una al lado de la otra a lo ancho del carretel:

$$N^{\circ} \text{ de espiras a lo ancho} = \frac{W}{D_c} \quad (8)$$

Siendo:

- W : Ancho del tambor

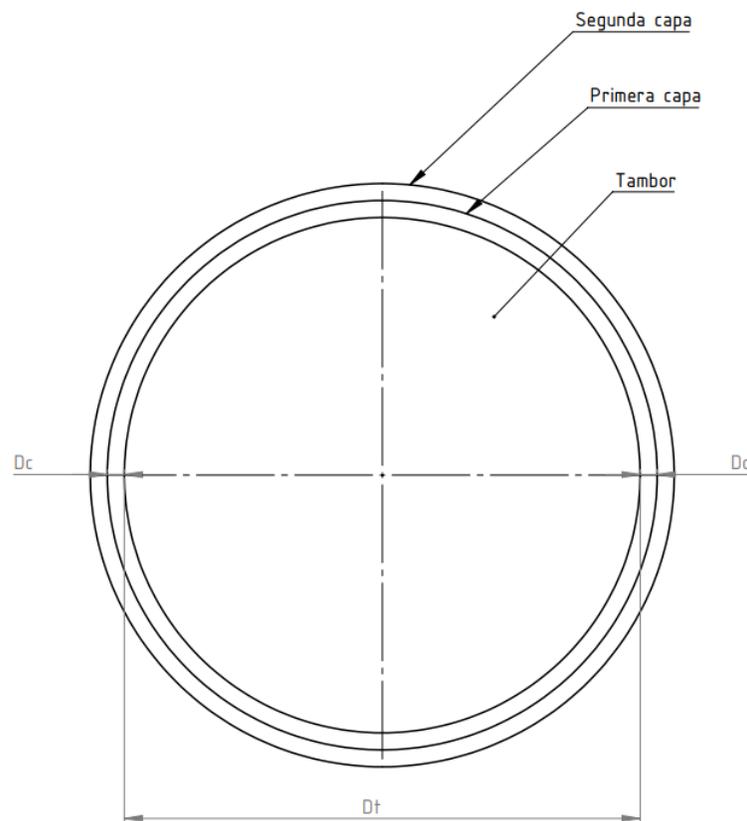
- D_c : Diámetro exterior del cable

Luego, para determinar la cantidad de espiras por capa de cable se debe multiplicar el término anterior por π (recordando que el perímetro, o mejor dicho la longitud, de una espira es $\pi * D_c$).

$$N^{\circ} \text{ de espiras por capa} = \pi * \frac{W}{D_c} \quad (9)$$

Cada capa se enrolla sobre un diámetro mayor, ya que el cable se va acumulando hacia afuera:

Figura 39



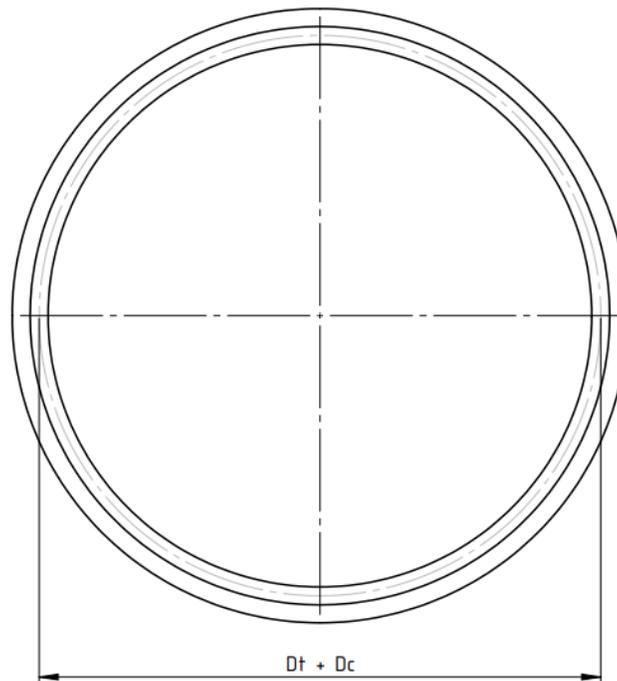
Nota. Vista lateral del tambor del carretel.

Cuando se enrolla una espira de cable, el centro del cable queda a una distancia $\frac{D_t}{2} + \frac{D_c}{2}$ respecto del eje. Es decir que el cable se enrolla con su centro siguiendo un círculo cuyo radio es:

$$R_{\text{espira}} = \frac{D_t}{2} + \frac{D_c}{2} \Rightarrow D_{\text{espira}} = D_t + D_c \quad (10)$$

Siendo D_t el diámetro externo del tambor.

Figura 40



Nota. Diámetro medio de la primera capa.

Cada nueva capa agrega una altura igual al diámetro del cable hacia afuera, pero el centro de esa nueva espira también se ubica a una distancia adicional de D_c . Entonces:

- *Capa 1 = diámetro medio = $D_t + D_c$*
- *Capa 2 = diámetro medio = $D_t + 3D_c$*

- $Capa\ 3 = \text{diámetro medio} = D_t + 5D_c$

Y así sucesivamente. Eso forma una progresión aritmética: la longitud de cada espira crece con el número de capas. La suma de una progresión aritmética se puede expresar como:

$$\text{Suma aritmética} = \frac{N}{2} * (\text{Primero} + \text{Enésimo}) \quad (11)$$

Siendo:

- $N = \text{número de capas enrolladas sobre el carretel}$
- $\text{Primero} = D_t + D_c$
- $\text{Enésimo} = D_t + D_c + 2 * (N - 1) * D_c = D_t + D_c * (2N - 1)$

Entonces:

$$\text{Suma aritmética} = \frac{N}{2} * (D_t + D_c + D_t + D_c * (2N - 1)) \quad (12)$$

$$\text{Suma aritmética} = \frac{N}{2} * (2D_t + 2ND_c) \quad (13)$$

La progresión aritmética permite obtener la suma de las longitudes de las capas progresivas que se enrollan sobre el carretel. Luego, la longitud total del cable enrollado se obtiene multiplicando el número de espiras por capa por la suma de las longitudes de las capas, es decir:

$$\text{Longitud total} = \pi * \frac{W}{D_c} * \left[\frac{N}{2} * (2D_t + 2ND_c) \right] \quad (14)$$

En este caso, se conoce la longitud total del cable (300 [m]), y el dato que se busca obtener es el número de capas (o porcentaje de la misma) en función de lo desenrollado que esté el cable. Este dato es crítico para determinar el factor de agrupamiento para el dimensionamiento del cable.

Desarrollando la Ecuación 14 y despejando N, se llega a:

$$\frac{L^*D_c}{\pi^*W} = \left[(ND_t + N^2D_c) \right] \quad (15)$$

$$N^2D_c + ND_t - \frac{L^*D_c}{\pi^*W} = 0 \quad (16)$$

Se obtiene como resultado una cuadrática donde:

- $A = D_c$
- $B = D_t$
- $C = -\frac{L^*D_c}{\pi^*W}$

Sabiendo que el número de capas tiene que ser un número mayor a cero, se considera únicamente la solución positiva de la ecuación correspondiente. El valor físico de N se explica a partir del siguiente cuadro:

Figura 41

$N < 1$ → cable parcialmente enrollado en la primera capa, no se llega a completar una capa entera.

$1 \leq N < 2$ → una capa completa + un poco de la segunda.

N entero → se completan justo N capas.

Nota. Representación del número de capas.

A partir de la expresión del número de capas, y considerando las dimensiones límite del carretel, se desarrolla un proceso iterativo con el propósito de definir las dimensiones óptimas del mismo. El objetivo principal es garantizar que el valor de N permanezca siempre por debajo de uno, de modo que el cable no llegue a formar más de una capa completa en operación. Es decir, se busca que el cable opere únicamente con una fracción de la primera capa.

Este porcentaje de ocupación de la primera capa permite establecer la separación entre espiras, a partir de la cual se determina el correspondiente factor de agrupamiento.

Para saber la separación entre espiras, primero se debe determinar la cantidad de espiras que entran una al lado de la otra a lo ancho del carretel:

$$\text{Espiras por capa} = \frac{W}{D_c} \quad (17)$$

Luego, la cantidad de espiras va a ser:

$$N^\circ \text{Espiras} = \text{Espiras por capa} \times N^\circ \text{Capas} \quad (18)$$

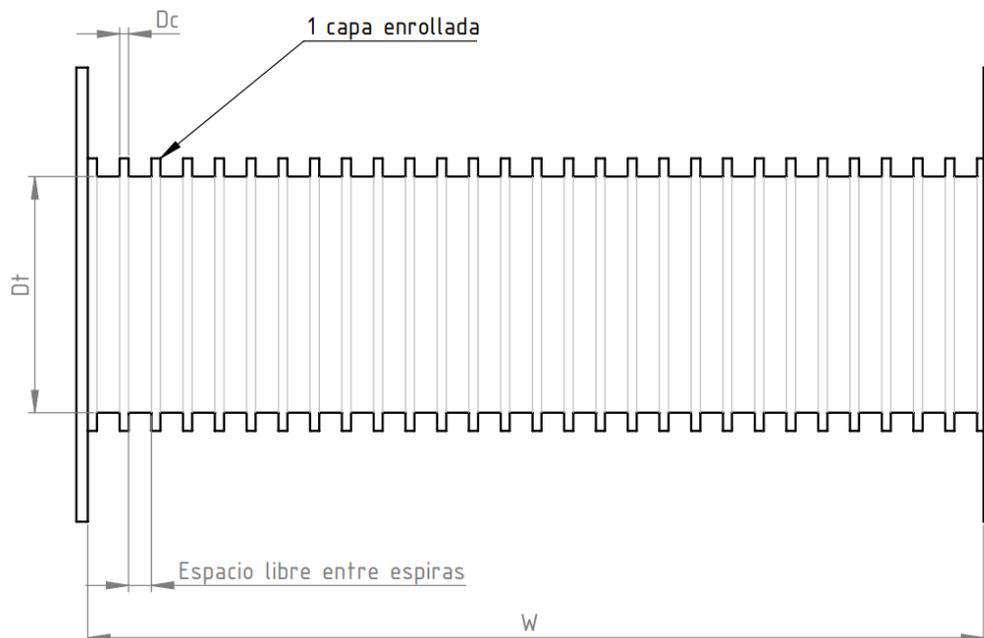
Sabiendo la cantidad de espiras, se puede determinar el paso entre las mismas:

$$\text{Paso [mm]} = \frac{W}{N^\circ \text{Espiras}} \quad (19)$$

Finalmente, se obtiene el espacio libre entre espiras:

$$\text{Espacio libre entre espiras [mm]} = \text{Paso} - D_c \quad (20)$$

Figura 42



Nota. Vista frontal del carretel.

Una de las principales limitaciones asociadas al uso de trailers es su peso máximo admisible. Este no puede superar cierto valor límite, establecido por la normativa vigente. En consecuencia, una vez definido el diseño del cable y su correspondiente carretel, es fundamental considerar el peso total del conjunto, incluidos todos los componentes del carretel y el transformador, para garantizar que la suma no exceda el valor permitido por la ley.

Previo al inicio del proceso de cálculo iterativo, se establecieron algunas consideraciones de diseño:

- En primer lugar, respecto al material del carretel, se optó por utilizar acero estructural debido al peso considerable del cable completamente enrollado. Esta elección busca prevenir deformaciones por flexión o pandeo en la estructura. Asimismo, se seleccionó acero inoxidable con el objetivo de proteger al carretel frente a la corrosión, dado que estará expuesto a condiciones climáticas adversas al operar en exteriores.

- El tambor del carretel estará constituido por un cilindro fabricado con una chapa de ocho [mm] de espesor. Los platos laterales estarán contruidos con el mismo espesor de chapa y tendrán un diámetro de un 10% mayor al del tambor, a fin de asegurar el correcto confinamiento del cable. Para conformar la forma cilíndrica del tambor, será necesario someter la chapa a un proceso de rolado. Este proceso presenta ciertas limitaciones técnicas que deben ser verificadas para asegurar la viabilidad de fabricación:

Figura 43

CARACTERÍSTICA	CAPACIDAD
Material	s/limitación
Espesor	hasta 3/4"
Ancho máximo	2500mm
Radio mínimo p/ 1/4"	400mm
Consideraciones	
A mayor espesor el radio mínimo aumenta	

Nota. Capacidad y limitaciones de la máquina de rolado.

Dado que tanto el espesor como el ancho de la chapa seleccionada se encuentran dentro de los límites permitidos por la maquinaria de rolado, se concluye que el proceso de conformado del tambor es técnicamente factible.

- Eje tubular montado sobre rodamientos.
- Se agregan refuerzos interiores radiales soldados al eje central.
- El carretel se montará de forma fija sobre el trailer, siendo abulonado al chasis con el objetivo de garantizar su estabilidad y verticalidad durante el transporte y la operación.
- Finalmente, debido al elevado peso y la longitud del cable que debe enrollarse y desenrollarse, se incorpora un motoreductor acoplado al eje central del tambor. Esta

solución permite automatizar la operación, evitando que deba realizarse de forma manual por el operario.

Cable

Una vez expuesto el procedimiento anterior, junto con las consideraciones correspondientes, se procede a la selección del cable. Para este propósito, se opta por un cable tripolar de aluminio extra flexible de la marca Cimet, con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE), armado y de categoría II. Las pérdidas dieléctricas del PVC son cinco veces mayores que el EPR y 25 veces más que el XLPE, por lo que el PVC debe ser desestimado como aislante en los cables de media y alta tensión, y es por eso que se opta utilizar un cable aislado en polietileno reticulado.

Figura 44



Nota. Carretel de Cimet para el transporte de cables de media tensión.

El mismo será instalado enterrado a una determinada profundidad, con el fin de evitar posibles daños provocados por el tránsito de operarios, equipos, maquinarias o vehículos. En la especificación del tendido enterrado se debe colocar una cinta de aviso de presencia de cable que se tenderá cerca de la superficie, con el propósito de evitar que cualquier operación de zanqueo dañe este cable.

Se decide emplear un cable extraflexible con el objetivo de facilitar las maniobras de enrollamiento, desenrollamiento y tendido del mismo en la locación, considerando las dimensiones y el peso del mismo.

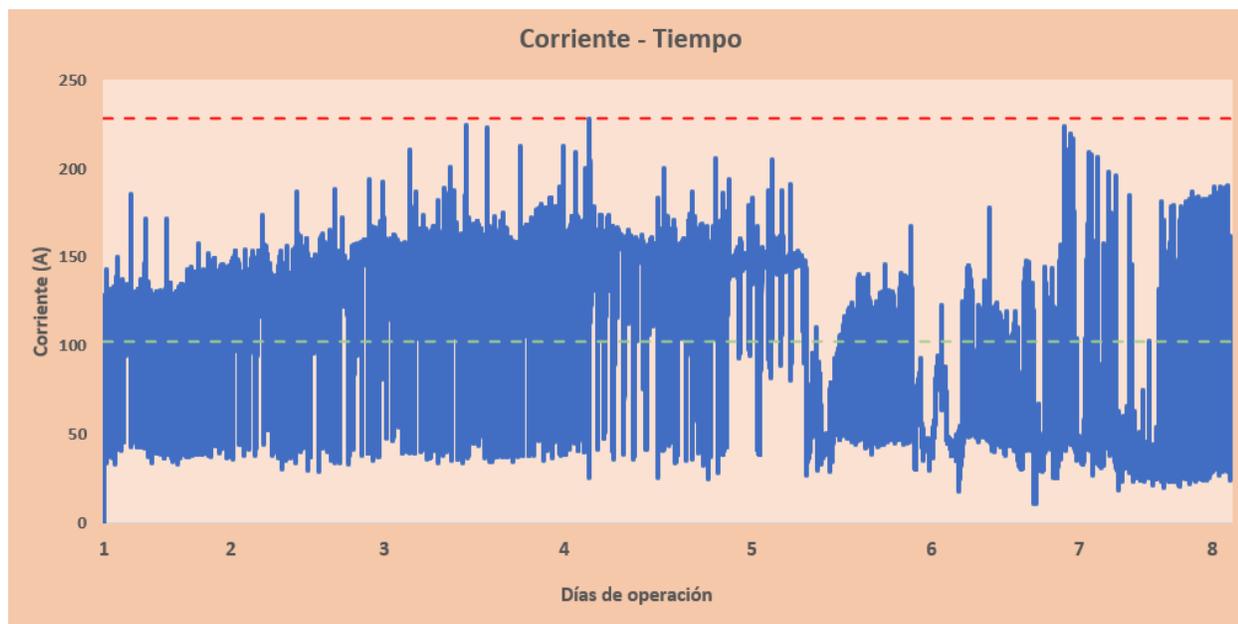
Elección por corriente

La corriente que debe soportar el cable del carretel depende de la potencia suministrada por el generador, del factor de potencia asociado y del nivel de tensión. Su cálculo se realiza conforme a la siguiente expresión:

$$I_{carretel} = \frac{P [kW]}{\sqrt{3} * U_N [kV] * FP} \quad (21)$$

$$I_{carretel} = \frac{P [kW]}{\sqrt{3} * 6,6 [kV] * 0,95} \quad (22)$$

Luego, la variación de la corriente en función de los días de operación se observa en el siguiente gráfico:

Figura 45

Nota: Corriente del carretel en función de los días de operación.

Se advierte que la corriente presenta fluctuaciones abruptas en intervalos de tiempo muy reducidos, lo que genera una discrepancia considerable entre el valor medio y el valor máximo de la misma. Ante esta situación, se decidió emplear la herramienta estadística denominada media móvil, con el objetivo de atenuar dichas fluctuaciones y evitar errores de diseño, tales como el sobredimensionamiento del cable al considerar únicamente el valor máximo, o su subdimensionamiento al basarse exclusivamente en el valor medio.

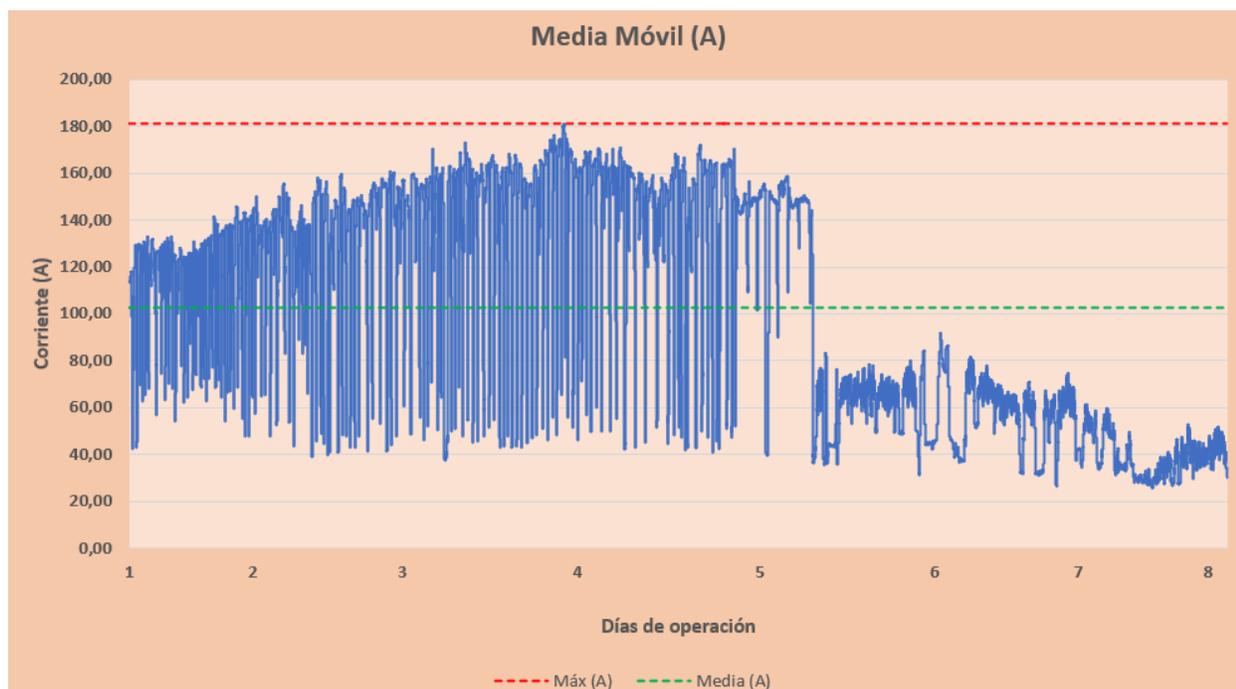
“Una media móvil simple (Moving Average) es la media aritmética de los ‘n’ datos anteriores. En esta técnica elemental de predicción, cuanto más grande sea ‘n’, mayor será la influencia de los datos antiguos. En contrapartida, si se selecciona una ‘n’ baja, se tendrán en cuenta datos más recientes para nuestra predicción.”(Media móvil, s.f.).

Por lo tanto, con el objetivo de filtrar datos aleatorios que generan grandes fluctuaciones en la curva, se elegirá un ‘n’ de valor alto. Entonces, la fórmula de la media móvil simple resulta:

$$MM = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I(t)_i \quad (23)$$

Tal como se indicó en el análisis de la carga, las muestras fueron registradas a intervalos de 10 segundos, un período considerablemente breve en comparación con los estándares habituales. Para evaluar aspectos térmicos del diseño, las mediciones suelen realizarse con frecuencias de muestreo de 10 a 15 minutos. Por este motivo, se optó por aplicar una media móvil sobre 90 registros consecutivos (que al ser de 10 segundos cada uno equivalen a 15 minutos) con el fin de representar de manera más adecuada el comportamiento térmico. En la figura siguiente se presenta gráficamente dicha media móvil de la corriente.

Figura 46

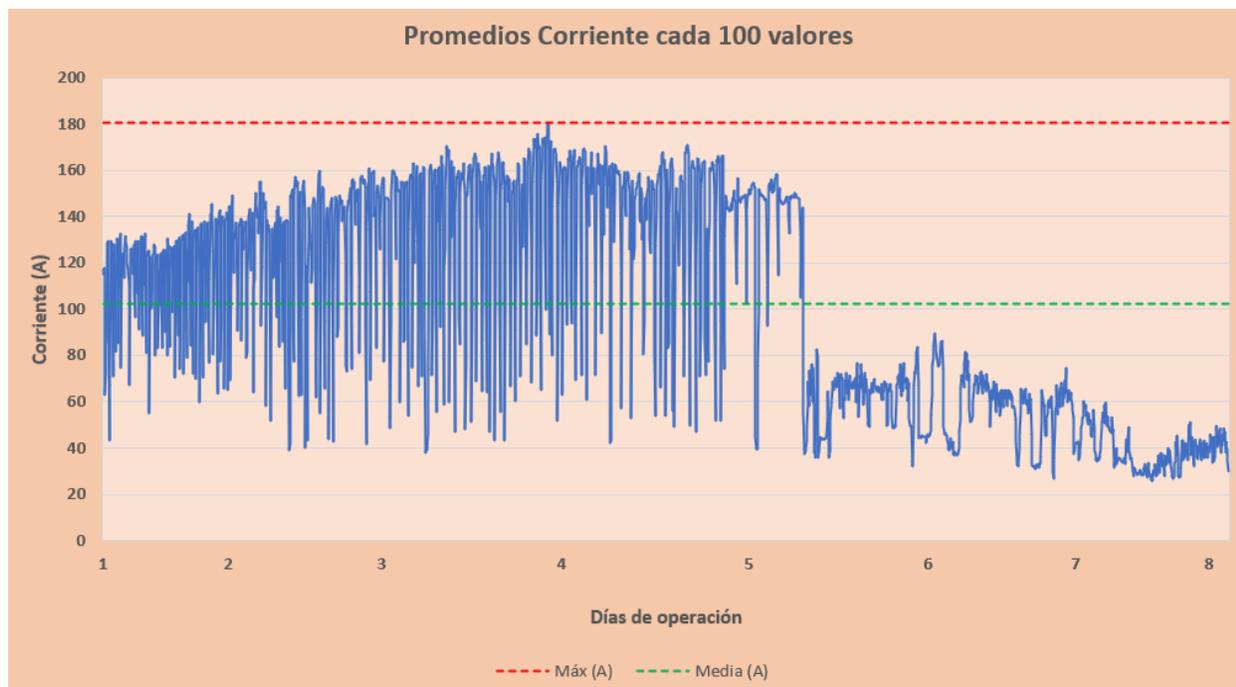


Nota: Media móvil de la corriente del carretel en función de los días de operación.

Donde la media máxima móvil resulta 181,09 [A], y la corriente media 102,61 [A].

Como complemento y con el propósito de validar el gráfico obtenido mediante el método de media móvil, se calcularon promedios de la corriente de empleo cada 90 valores. Esta técnica adicional persigue, nuevamente, el objetivo de suavizar los picos máximos de corriente. El gráfico resultante se presenta a continuación:

Figura 47



Nota: Promedio de la corriente cada 100 valores en función de los días de operación.

En este caso, la corriente máxima resulta 180,65 [A] y la media 102,54 [A].

Al comparar ambos gráficos, se observa una tendencia similar en los resultados, lo que permite validar la utilización del método de la media móvil. Dado que esta técnica ofrece una mayor precisión al reflejar con mayor fidelidad las variaciones locales de la señal, se considera adecuada y preferible frente al simple promedio de valores, especialmente para el análisis de picos de corriente. Finalmente, los datos que se utilizarán para el dimensionamiento del cable son los siguientes:

$$I_{m\acute{a}x} = 181,09 \text{ [A]}$$

$$I_{media} = 102,61 [A]$$

Luego, se selecciona del catálogo de Cimet un cable por corriente nominal, que debe ser superior a la corriente máxima calculada previamente mediante la media móvil:

Figura 48

SECCIÓN (mm ²)	ENTERRADOS			EN AIRE			
25	120	125	109	116	118	139	100
35	144	149	130	140	143	168	120
50	169	175	153	167	172	202	144
70	209	216	187	209	215	253	178
95	250	259	222	255	261	308	215
120	285	295	254	295	302	356	248
150	318	326	287	335	342	400	281
185	359	367	325	386	393	459	323
240	416	423	375	457	465	540	378
300	473	479	424	525	533	616	432
400	537	532	484	612	615	700	502
500	597	623		707	718	827	
630	681	713		825	837	963	

Nota: Intensidades de corrientes nominales para cables con conductores de aluminio.

Figura 49

SECCIÓN	DIÁMETRO APROXIMADO CONDUCTOR	ESPESOR NOMINAL AISLACIÓN	SIN ARMAR				ARMADOS			
			ESPESOR NOMINAL ENVOLTURA	DIÁMETRO EXTERIOR APROX.	PESO APROX.		ESPESOR NOMINAL ENVOLTURA	DIÁMETRO EXTERIOR APROX.	PESO APROX.	
					COBRE	ALUMINIO			COBRE	ALUMINIO
mm ²	mm	mm	mm	mm	kg/km	kg/km	mm	mm	kg/km	kg/km
UNIPOLARES										
25	5,9	3,3	1,6	20,8	650		1,7	25,2	878	
35	7,0	3,3	1,6	21,8	768		1,8	26,2	1.006	
50	8,1	3,3	1,7	22,8	899	610	1,8	27,2	1.147	848
70	9,9	3,3	1,7	24,4	1.136	714	1,9	28,8	1.400	968
95	11,5	3,3	1,8	26,2	1.421	833	1,9	30,8	1.716	1.117
120	13,0	3,3	1,8	27,5	1.681	939	2,0	32,1	1.990	1.236
150	14,4	3,3	1,9	28,9	1.971	1.051	2,0	33,7	2.309	1.377
185	16,1	3,3	1,9	31,1	2.386	1.235	2,1	35,7	2.733	1.569
240	18,5	3,3	2,0	33,6	2.982	1.469	2,1	38,2	3.355	1.828
300	21,0	3,3	2,1	35,9	3.608	1.694	2,2	40,7	4.023	2.093
400	23,8	3,3	2,2	38,5	4.466	2.007	2,3	43,5	4.929	2.452
500	26,5	3,3	2,3	41,6	5.487	2.386	2,4	46,6	5.983	2.866
630	31,6	3,3	2,4	45,4	6.918	2.901	2,5	50,6	7.480	3.444
TRIPOLARES										
25	5,9	3,3	2,2	40,8	2.212		2,3	45,6	3.544	
35	7,0	3,3	2,3	43,2	2.641		2,4	48,2	4.091	
50	8,1	3,3	2,4	46,2	3.192	2.277	2,5	51,2	4.739	3.824
70	9,9	3,3	2,5	49,8	4.032	2.709	2,6	54,8	5.698	4.374
95	11,5	3,3	2,6	53,9	5.084	3.251	2,8	59,5	7.014	5.180
120	13,0	3,3	2,7	56,9	6.004	3.697	2,9	62,5	8.034	5.731
150	14,4	3,3	2,8	60,2	7.040	4.188	3,0	65,8	9.189	6.337
185	16,1	3,3	3,0	64,9	8.493	4.930	3,1	70,5	10.833	7.270
240	18,5	3,3	3,1	70,0	10.647	5.974	3,3	76,0	13.171	8.499
300	21,0	3,3	3,3	75,4	12.887	6.982	3,4	81,4	15.634	9.729

Nota: Características dimensionales de cables con tensión nominal de 6,6 [kV] - Categoría II.

Se selecciona un cable tripolar de sección 70 [mm²], cuya corriente nominal es de 187 [A]. “La corriente nominal de un cable es aquella que, bajo determinadas condiciones preestablecidas de instalación, operación y ambiente, llevan a este a una temperatura de régimen compatible con su material aislante. Si alguna de las condiciones de instalación, operación o ambiente no coinciden con las preestablecidas, deberá aplicarse factores de corrección. A la corriente así establecida la denominaremos corriente admisible.” (Ferreira, s.f.,p.5)

Condiciones de instalación de referencia

Tal como se mencionó previamente, el cable será enrollado sobre un carretel, pudiendo operar en distintas condiciones: parcialmente enrollado o, en el mejor de los casos, completamente desenrollado. Asimismo, se indicó que, antes de su puesta en servicio, el cable será enterrado con el objetivo de protegerlo frente a posibles daños mecánicos. En consecuencia, durante su operación, el cable presentará tramos expuestos al aire y otros enterrados, por lo que deben considerarse dos métodos de instalación de referencia: en aire y subterráneo. Por tal motivo, se analizan ambos casos extremos —instalación completamente en aire y completamente enterrada— y se adopta como criterio de diseño el más desfavorable entre ambos.

- **Opción 1: Enterrado**

Las condiciones nominales de instalación en tierra para este tipo de cable son las siguientes:

- Temperatura del terreno: 25 [°C]
- Temperatura máxima en los conductores: 90 [°C]
- Profundidad de instalación: 0,5 [m]
- Resistividad térmica específica del terreno: 1 [k.m/W]
- Corriente alterna de 50 [Hz]

Al presentarse valores distintos de estas condiciones nominales se corregirá la corriente nominal.

- **Opción 2: En aire**

Las condiciones nominales de instalación en aire para este tipo de cable son las siguientes:

- Temperatura del aire: 40 [°C]
- Temperatura máxima en los conductores: 90 [°C]

- Corriente alterna de 50 [Hz]

Factores de corrección

- **Opción 1: Enterrado**

Factor de temperatura y resistividad térmica

En la zona de Vaca Muerta (Neuquén) predominan condiciones áridas y semiáridas, con veranos de altas temperaturas ambientales que suelen superar los 35 [°C]. A la profundidad típica de tendido de cables (0,7–1,0 [m]), la literatura técnica y las normas IEC recomiendan considerar una temperatura de terreno de 30 [°C] como valor de referencia, pudiendo adoptarse 35 [°C] en condición crítica de verano para aplicar los factores de corrección correspondientes. Asimismo, debido a la escasa humedad del suelo en la estación seca, es razonable suponer una resistividad térmica elevada, del orden de 2,5 [K·m/W], llegando incluso a 3,0 [K·m/W]. Estos valores son consistentes con las guías internacionales (IEC 60287/60364) y resultan apropiados para un diseño conservador en esta región. Entonces:

Figura 50

TEMPERATURA DEL TERRENO [°C]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
FACTOR	1,11	1,07	1,04	1	0,97	0,93	0,89	0,83	0,79	0,74	0,68

Nota: Factor de corrección de temperatura del terreno para cables directamente enterrados (aislados en XLPE).

El factor de corrección por temperatura del terreno resulta de 0,93.

Figura 51

TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD TÉRMICA DEL TERRENO (K.m/W)	FACTOR DE CORRECCIÓN
muy húmedo	0,50	1,25
húmedo	0,80	1,08
normal, seco	1,00	1,00
muy seco	1,50	0,85
70% tierra, 30% arena, ambas muy secas	2,00	0,75
70% arena, 30% tierra, ambas muy secas	2,50	0,67
muy seco	3,00	0,60

Nota: Factor de corrección por el tipo de terreno.

El factor de corrección por el tipo de terreno resulta de 0,60.

Factor de profundidad

El cable será directamente enterrado a una profundidad de 0,5 [m]. Por lo tanto, se afectará la corriente nominal a partir de la siguiente figura.

Figura 52

PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN [m]	CABLES UNIPOLARES		CABLES TRIPOLARES
	SECCIÓN ≤ 185 mm ²	SECCIÓN > 185 mm ²	
0,5	1,04	1,06	1,04
0,6	1,02	1,04	1,03
1	0,98	0,97	0,98
1,25	0,96	0,95	0,96
1,5	0,95	0,93	0,95
1,75	0,94	0,91	0,94
2	0,93	0,90	0,93
2,5	0,91	0,88	0,91
3	0,90	0,86	0,90

Nota: Factor de corrección de profundidad para cables directamente enterrados.

Al ser un cable tripolar, el factor de corrección resulta igual a 1,04.

Factor de flexibilidad

Dado que se trata de un cable extra flexible, clase 5, y conforme a la recomendación del fabricante Cimet, corresponde aplicar un factor de corrección de 0,95 al valor de la corriente nominal indicado en el catálogo.

Factor de corrección final

Luego, el factor de corrección final para este método de instalación es el siguiente:

$$FC_1 = 0,93 * 0,60 * 1,04 * 0,95 = 0,551 \quad (24)$$

- **Opción 2: En aire***Factor de corrección por temperatura*

Como se mencionó previamente, la temperatura máxima del lugar de instalación (Vaca Muerta, Neuquén) es de 40 [°C], misma temperatura que la nominal. Por ende, el factor de corrección por temperatura es 1.

Factor de flexibilidad

Idem caso anterior.

Factor de agrupamiento

Para este factor, se utilizó la siguiente figura en la cual se selecciona dicho factor en función del número de circuitos y de la distancia entre centros de cable.

Figura 53

CABLES TRIPOLARES DIRECTAMENTE ENTERRADOS					
NÚMERO DE CABLES EN GRUPOS	ESPACIO ENTRE CENTROS DE CABLES [mm]				
	EN CONTACTO	200	400	600	800
2	0,80	0,86	0,90	0,92	0,94
3	0,69	0,77	0,82	0,86	0,89
4	0,62	0,72	0,79	0,83	0,87
5	0,57	0,68	0,76	0,81	0,85
6	0,54	0,65	0,74	0,80	0,84

Nota: Factor de corrección de agrupamiento en función del número de circuitos.

Como se explicó previamente, el dimensionamiento del cable surge de un proceso iterativo en una plantilla de cálculo que es función no sólo del cable sino también del carretel.

Para un cable de 70 [mm²] de sección, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3

<i>Sección [mm²]</i>	70
<i>Corriente nominal [A]</i>	187
<i>Radio de curvatura mínimo [mm]</i>	822
<i>Diámetro tambor mínimo [mm]</i>	1644
<i>Diámetro tambor [mm]</i>	2000
<i>Ancho carretel [mm]</i>	2000
<i>Longitud de cable enrollado [m]</i>	200
<i>Diámetro exterior total [mm]</i>	2109,6
<i>Número de capas</i>	0,85
<i>Espiras por capa</i>	36
<i>Número de espiras</i>	30
<i>Paso entre espiras [mm]</i>	66,67

Nota: Valores calculados de la primera iteración a partir de la planilla de cálculo.

Se observa que el número de espiras es superior a 6, que es el último valor que aparece en la Figura 53. Para poder determinar el factor de agrupamiento para 30 cables se debe realizar una extrapolación. Para ello, se utiliza una función exponencial decreciente desplazada de la forma:

$$f(x) = a * e^{-b*x} + c \quad (25)$$

Donde:

- x : Número de cables del grupo

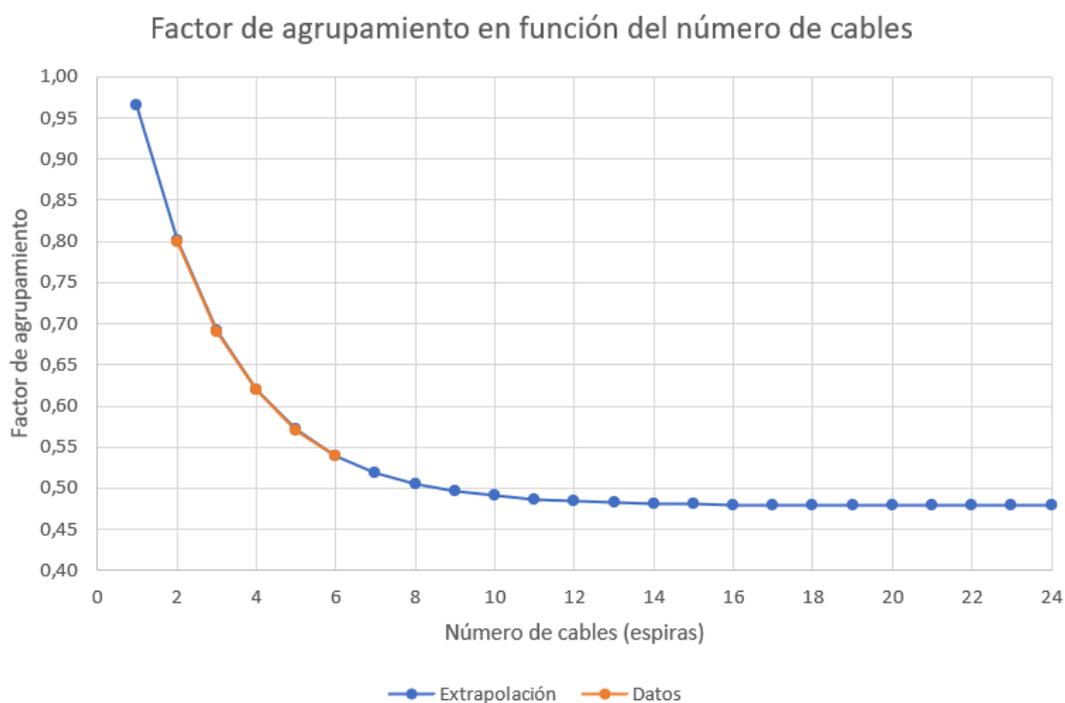
- a , b y c : parámetros ajustados mediante mínimos cuadrados para que la curva se aproxime lo mejor posible a los datos disponibles.

Luego, los parámetros obtenidos resultan:

$$f(x) = 0,737 * e^{-0,415*x} + 0,479 \quad (26)$$

El gráfico que se obtiene es el siguiente:

Figura 54



Nota: Extrapolación del factor de agrupamiento en función del número de cables.

Se observa que el modelo se ajusta casi a la perfección a los datos provistos por Cimet.

A partir de 23 espiras, el factor de agrupamiento toma un valor asintótico igual a 0,4790.

Factor de corrección final

Luego, el factor de corrección final para este método de instalación es el siguiente:

$$FC_2 = 1 * 0,95 * 0,4790 = 0,46 \quad (27)$$

Finalmente,

$$FC_2 = 0,46 < FC_1 = 0,551 \quad (28)$$

Se observa que el método más desfavorable de instalación es en el aire. Por lo tanto, se usa éste método de instalación como referencia.

Corriente admisible

La corriente admisible resulta:

$$I_{admisible} = I_{nominal} [A] * FC_2 \quad (29)$$

$$I_{admisible} = 187 * 0,46 \quad (30)$$

$$I_{admisible} \simeq 86 [A] < 181,09 [A] \quad (31)$$

Se observa que el cable de 70 [mm²] no verifica. Luego de un proceso iterativo, se determinó que la sección del cable adecuada es de 240 [mm²], cuya corriente admisible y dimensiones se observan en las siguientes figuras:

Figura 55

SECCIÓN (mm ²)	ENTERRADOS			EN AIRE			
25	120	125	109	116	118	139	100
35	144	149	130	140	143	168	120
50	169	175	153	167	172	202	144
70	209	216	187	209	215	253	178
95	250	259	222	255	261	308	215
120	285	295	254	295	302	356	248
150	318	326	287	335	342	400	281
185	359	367	325	386	393	459	323
240	416	423	375	457	465	540	378
300	473	479	424	525	533	616	432
400	537	532	484	612	615	700	502
500	597	623		707	718	827	
630	681	713		825	837	963	

Nota: Intensidades de corrientes nominales para cables con conductores de aluminio.

Figura 56

SECCIÓN	DIÁMETRO APROXIMADO CONDUCTOR	ESPESOR NOMINAL AISLACIÓN	SIN ARMAR				ARMADOS			
			ESPESOR NOMINAL ENVOLTURA	DIÁMETRO EXTERIOR APROX.	PESO APROX.		ESPESOR NOMINAL ENVOLTURA	DIÁMETRO EXTERIOR APROX.	PESO APROX.	
					COBRE	ALUMINIO			COBRE	ALUMINIO
mm ²	mm	mm	mm	mm	kg/km	kg/km	mm	mm	kg/km	kg/km
UNIPOLARES										
25	5,9	3,3	1,6	20,8	650		1,7	25,2	878	
35	7,0	3,3	1,6	21,8	768		1,8	26,2	1.006	
50	8,1	3,3	1,7	22,8	899	610	1,8	27,2	1.147	848
70	9,9	3,3	1,7	24,4	1.136	714	1,9	28,8	1.400	968
95	11,5	3,3	1,8	26,2	1.421	833	1,9	30,8	1.716	1.117
120	13,0	3,3	1,8	27,5	1.681	939	2,0	32,1	1.990	1.236
150	14,4	3,3	1,9	28,9	1.971	1.051	2,0	33,7	2.309	1.377
185	16,1	3,3	1,9	31,1	2.386	1.235	2,1	35,7	2.733	1.569
240	18,5	3,3	2,0	33,6	2.982	1.469	2,1	38,2	3.355	1.828
300	21,0	3,3	2,1	35,9	3.608	1.694	2,2	40,7	4.023	2.093
400	23,8	3,3	2,2	38,5	4.466	2.007	2,3	43,5	4.929	2.452
500	26,5	3,3	2,3	41,6	5.487	2.386	2,4	46,6	5.983	2.866
630	31,6	3,3	2,4	45,4	6.918	2.901	2,5	50,6	7.480	3.444
TRIPOLARES										
25	5,9	3,3	2,2	40,8	2.212		2,3	45,6	3.544	
35	7,0	3,3	2,3	43,2	2.641		2,4	48,2	4.091	
50	8,1	3,3	2,4	46,2	3.192	2.277	2,5	51,2	4.739	3.824
70	9,9	3,3	2,5	49,8	4.032	2.709	2,6	54,8	5.698	4.374
95	11,5	3,3	2,6	53,9	5.084	3.251	2,8	59,5	7.014	5.180
120	13,0	3,3	2,7	56,9	6.004	3.697	2,9	62,5	8.034	5.731
150	14,4	3,3	2,8	60,2	7.040	4.188	3,0	65,8	9.189	6.337
185	16,1	3,3	3,0	64,9	8.493	4.930	3,1	70,5	10.833	7.270
240	18,5	3,3	3,1	70,0	10.647	5.974	3,3	76,0	13.171	8.499
300	21,0	3,3	3,3	75,4	12.887	6.982	3,4	81,4	15.634	9.729

Nota: Características dimensionales de cables con tensión nominal de 6,6 [kV] - Categoría II.

La corriente admisible resulta:

$$I_{admisible} = I_{nominal}[A] * FC_2 \quad (32)$$

$$I_{admisible} = 375 * 0,46 \quad (33)$$

$$I_{admisible} \simeq 174 [A] \quad (34)$$

Se advierte que la corriente admisible del conductor resulta levemente inferior al valor máximo calculado previamente. No obstante, tal como se muestra en la Figura 46, dicho pico máximo, correspondiente a 181,09 [A], ocurre una única vez, mientras que durante el resto del tiempo la corriente se mantiene por debajo de los 174 [A] permitidos por la corriente admisible. Al ser un cable aislado en polietileno reticulado (XLPE) admite un régimen de sobrecarga. El polietileno reticulado es un material termoestable (una vez reticulado no se ablanda con el calor) presenta mejores características eléctricas y térmicas que el PVC por lo que se lo utiliza en la construcción de cables de baja, media y alta tensión. Su termoestabilidad hace que puedan funcionar con temperaturas de 90 [°C] en forma permanente en los conductores y 250 [°C] en caso de cortocircuito. En ciertas situaciones de operación, los aislantes del tipo termoestables permiten sobrepasar la temperatura de régimen permanente en forma controlada, afectando muy poco la vida útil.

En consecuencia, puede concluirse que el conductor está en condiciones de soportar esta sobrecarga puntual sin comprometer su integridad. Por lo tanto, no se justifica la selección de una sección mayor, ya que ello implicaría un sobredimensionamiento innecesario. Por otro lado, resulta razonable admitir ciertas sobrecargas en el cable, considerando que no se prevé una vida útil prolongada debido al enrollado y desenrollado frecuentes, aun tratándose de un conductor altamente flexible, sumado al desgaste adicional que conlleva el enterrado y desenterrado reiterado.

Dimensiones finales

Cable

En la Figura 56 se aprecia que el diámetro exterior del cable es de 76 [mm] mientras que el peso por unidad de longitud es de 8499 [kg/km]. Luego, considerando que la longitud del cable es de 300 [m] (0,3 [km]), el peso total del cable resulta:

$$\text{Peso total del cable} = 8499 \left[\frac{\text{kg}}{\text{km}} \right] * 0,3 [\text{km}] = 2549,7 [\text{kg}] \quad (35)$$

A modo de resumen, se enumeran en la siguiente tabla las características del cable seleccionado.

Tabla 4

<i>Sección [mm²]</i>	240
<i>Corriente nominal [A]</i>	375
<i>Diámetro exterior [mm]</i>	76
<i>Radio de curvatura mínimo [mm]</i>	1140
<i>Longitud del cable [m]</i>	300
<i>Peso del cable [kg]</i>	2549,7

Nota: Características del cable.

Carretel

Luego, una vez determinadas todas las dimensiones del cable, se procede a realizar los cálculos correspondientes (detallados en la sección *Carretel*) mediante una planilla de cálculo.

En la siguiente tabla se adjuntan todas las dimensiones de interés:

Tabla 5

<i>Diámetro tambor mínimo [mm]</i>	2280
<i>Diámetro tambor [mm]</i>	2300
<i>Espesor [mm]</i>	8
<i>Diámetro interior [mm]</i>	2284
<i>Ancho carretel [mm]</i>	2300
<i>Longitud de cable enrollado [m]</i>	200
<i>Diámetro exterior total [mm]</i>	2452
<i>Número de capas</i>	0,89
<i>Espiras por capa</i>	30
<i>Número de espiras</i>	26
<i>Paso entre espiras [mm]</i>	88,46

Nota: Dimensiones finales del carretel.

Una vez determinadas las dimensiones del carretel, se procede a calcular el peso del mismo. En primer lugar, se calcula el volumen de material que se necesita. Al ser un cilindro hueco, de espesor ocho [mm], la ecuación es la siguiente:

$$Volumen [m^3] = \frac{\pi * W * \left(\frac{D_e^2 - D_i^2}{4} \right)}{1000^3} \quad (36)$$

Donde:

- D_e : *diámetro exterior del tambor*
- D_i : *diámetro interior del tambor*
- W : *ancho del tambor*
- 1000^3 : *factor de conversión de mm³ a m³*

Luego,

$$Volumen = \frac{\pi * 2300 [mm] * \left(\frac{(2300 [mm])^2 - (2284 [mm])^2}{4} \right)}{1000^3} = 0,13 [m^3] \quad (37)$$

Finalmente, para determinar el peso del tambor, se multiplica el volumen por la densidad del acero ($\delta_{acero} = 7850 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$):

$$Peso\ tambor = 0,13 [m^3] * 7850 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 1020,5 [kg] \quad (38)$$

Resulta complejo determinar con precisión el peso del carretel completo, dado que al tambor deben añadirse el eje central (dimensionado más adelante), los refuerzos internos, la base o soporte estructural y el conjunto motoreductor para el enrollado y desenrollado del cable. En esta instancia se adopta una estimación global, adecuada para servicio industrial, asumiendo que el peso total del carretel equivale al doble del peso del tambor. Bajo esta hipótesis, el peso del conjunto asciende a 2000 [kg].

Verificación por caída de tensión

La caída de tensión es un valor que rara vez es dominante para determinar la sección del conductor a utilizar en la línea de MT, pero es necesario comprobar que su valor no supera los límites que se establecen.

En régimen nominal

Se verifica la caída de tensión máxima según lo establecido en el reglamento de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles de la AEA. La sumatoria de caídas de tensión entre la acometida y los puntos de utilización no debe superar:

- ❖ Iluminación y cargas no rotantes: 3 %
- ❖ Fuerza motriz: 5 % (en régimen) y 15 % (en arranque)

Luego se verifica la caída de tensión de cada carga desde la salida del transformador hasta el punto de utilización.

En el caso de los motores se realiza la verificación en régimen y durante el arranque. Durante el arranque se toma la corriente de arranque dada en el catálogo de motores del anexo, por otro lado se considera un factor de potencia de 0,3 según lo indicado en el apartado 771.19.7 (Caídas de tensión) de la norma AEA 90364-7-771.

La caída de tensión en un circuito es la diferencia de los valores absolutos entre las tensiones al inicio y fin del mismo.

$$\Delta U[V] = |U_1| - |U_2| \quad (39)$$

Como valor aproximado se calcula como:

$$\Delta U[V] = \sqrt{3} I * (R. \cos\varphi + X. \sen\varphi) \quad (40)$$

“En instalaciones industriales abastecidas en MT, si bien no está reglamentado, puede admitirse que la sumatoria de caídas de tensión entre los bornes del transformador y los puntos de suministro sean un poco mayores (del orden de 1,5 % más) ya que en esta situación no se tiene la caída en la red de BT de la empresa distribuidora.” (Ferreyra, s.f.,p.11)

Los datos de la resistencia e inductancia se obtuvieron de las tablas de Cimet.

Figura 57

SECCIÓN	RESISTENCIA ELÉCTRICA [ohm/km]				REACTANCIA INDUCTIVA A 50 Hz [ohm/km]				CAPACIDAD [μF/km]
	COBRE		ALUMINIO						
	A 20 °C	A 90 °C	A 20 °C	A 90 °C					
[mm²]	EN CC	A 50 Hz	EN CC	A 50 Hz					
25	0,727	0,927	1,200	1,539	0,120	0,191	0,244	0,133	0,211
35	0,524	0,668	0,868	1,113	0,113	0,184	0,234	0,126	0,235
50	0,387	0,494	0,641	0,822	0,108	0,178	0,225	0,120	0,261
70	0,268	0,342	0,443	0,568	0,102	0,171	0,215	0,113	0,298
95	0,193	0,246	0,320	0,410	0,097	0,166	0,206	0,108	0,332
120	0,153	0,196	0,253	0,325	0,094	0,162	0,200	0,104	0,364
150	0,124	0,159	0,206	0,264	0,091	0,158	0,194	0,100	0,396
185	0,099	0,127	0,164	0,211	0,089	0,156	0,188	0,098	0,430
240	0,075	0,097	0,125	0,161	0,086	0,153	0,181	0,095	0,483
300	0,060	0,078	0,100	0,129	0,084	0,150	0,176	0,092	0,526
400	0,047	0,061	0,078	0,101	0,081	0,147	0,169	0,089	0,593
500	0,0366	0,048	0,0605	0,079	0,077	0,144	0,162	0,086	0,657
630	0,0283	0,038	0,0469	0,061	0,074	0,142	0,156	0,083	0,725

Nota: Parámetros eléctricos de cables de 6,6 [kV] - Categoría 2.

Por lo tanto, los valores resultan:

$$r = 0,161 [\Omega/km] \quad (41)$$

$$x = 0,095 [\Omega/km] \quad (42)$$

Se opta por considerar la corriente máxima porque, en ese instante, la caída de tensión puede tener un impacto significativo en el funcionamiento del sistema.

Teniendo en cuenta los datos previamente expuestos y que el factor de potencia es igual a 0,95, se calcula:

$$\Delta U = \sqrt{3} * 228[A] * 0,3[km] * (0,161 \cdot \cos(18^\circ) + 0,095 \cdot \sen(18^\circ)) \quad (43)$$

$$\Delta U = 21,62 [V] \quad (44)$$

Luego, la caída de tensión porcentual resulta:

$$\Delta U = \frac{21,62 [V]}{6600 [V]} * 100 = 0,33\% \quad (45)$$

Se aprecia que este valor es menor que 6,5% (1,5% más respecto al 5% por ser un cable de MT), por lo tanto, se verifica la caída de tensión en régimen nominal.

Motor en arranque

Para el caso de motores en arranque, en base a los datos proporcionados por la marca WEG, se obtiene la corriente de arranque del motor asíncrono. Para calcularla, se considera que la corriente de arranque es del orden de 6 veces la corriente nominal. Entonces:

$$I_{arr} = 6 * I_n = 6 * 280,7[A] = 1684,2 [A] \quad (46)$$

En el arranque se supone un $fp = 0,3 \rightarrow \varphi = 72,54^\circ$. Se admite un máximo 15% de caída de tensión. Pero como ya se aclaró anteriormente, al estar en MT, resulta un máximo de 16,5%.

$$\Delta U = \sqrt{3} * 1684,2[A] * 0,3[km] * (0,161 \cdot \cos(72,5^\circ) + 0,095 \cdot \sen(72,5 \quad (47)$$

$$\Delta U = 121,66 [V] \quad (48)$$

Luego, la caída de tensión porcentual resulta:

$$\Delta U = \frac{121,66 [V]}{6600 [V]} \cdot 100 = 1,84\% \quad (49)$$

Se aprecia que este valor es menor que 16,5% por lo tanto se verifica la caída de tensión en arranque.

Transformador

Como la red eléctrica es de 33 [kV] y el variador de frecuencia requiere una tensión de alimentación de 6,6 [kV], se necesita colocar un transformador reductor. Luego, la relación de transformación es la siguiente:

$$i = \frac{U_2}{U_1} = \frac{6,6 [kV]}{33 [kV]} = 0,2 \quad (50)$$

Siendo:

- U_2 : tensión de salida del transformador
- U_1 : tensión de entrada del transformador

El transformador se dimensiona a partir de la corriente demandada por el *genset*, es decir, de la media móvil máxima empleada para dimensionar el cable del carretel. Dado que las pérdidas en los conductores son de un orden de magnitud considerablemente inferior al de la demanda impuesta por las cargas, su influencia puede despreciarse en el dimensionamiento del transformador. En consecuencia, la potencia requerida del transformador es:

$$S [kVA] = \sqrt{3} * U_N [kV] * I_{transformador} \quad (51)$$

$$S [kVA] = \sqrt{3} * 6,6 [kV] * 181,09 [A] \quad (52)$$

$$S = 2070 [kVA] \quad (53)$$

Para evitar el sobredimensionamiento del transformador, ya que operaría durante prolongados períodos en condiciones de baja carga, se analiza la viabilidad de instalar un

transformador de 2 [MVA], debiéndose verificar su capacidad para tolerar sobrecargas por encima de esta potencia.

“El tiempo de sobrecarga máximo admisible de los transformadores, en función de la carga previa y de la temperatura del medio refrigerante se indica en la Figura 58 para transformadores en aceite con refrigeración por aire, siendo:

- K1: carga inicial (previa) con referencia a la carga nominal;
- K2: carga admisible con referencia a la carga nominal;
- t: tiempo en horas, duración de K2;
- θ_a : temperatura en °C del medio refrigerante ($\theta_a = 20$ [°C])

Por lo tanto:

$$K1 = \frac{S_1}{S_N}; K2 = \frac{S_2}{S_N}; \frac{K2}{K1} = \frac{S_2}{S_1} \quad (54)$$

S_1 significa la carga inicial, S_2 la carga admisible y S_N la carga nominal. Nota: en un ciclo normal de carga, K2 no debería sobrepasar el valor de 1,5.” (Brown Boveri, 1983, p.143).

La potencia nominal es $S_N = 2000$ [kVA]. Para determinar la carga admisible, es decir la máxima, se debe determinar la potencia real que consume el genset. Para ello, se debe afectar la potencia consumida por la carga por la eficiencia del conjunto VFD-motor-generator:

$$\eta_{conjunto} = \eta_{VFD} * \eta_{motor} * \eta_{alternador} = 0,95 * 0,967 * 0,96 = 0,88 \quad (55)$$

Luego, la potencia necesaria para alimentar al conjunto mencionado se obtiene de la siguiente manera:

$$P_{conjunto} [kW] = \frac{P_{carga} [kW]}{0,88} \quad (56)$$

Sabiendo que la potencia activa máxima que consume la carga es de 2200 [kW]:

$$P_{m\acute{a}x} [kW] = \frac{2200 [kW]}{0,88} = 2494,6 [kW] \quad (57)$$

Tal como se describi3 en la secci3n correspondiente al variador de frecuencia, las c3lulas de potencia del mismo incorporan un rectificador a diodos, el cual permite 3nicamente el flujo de energ3a desde la red hacia el bus de corriente continua (DC). Debido a esta caracter3stica unidireccional, el rectificador no tiene capacidad para generar ni controlar la entrega de potencia reactiva hacia la red. En consecuencia, el VFD se comporta como una carga predominantemente inductiva o no lineal desde la perspectiva de la red de alimentaci3n. Por esta raz3n, el factor de potencia que debe considerarse en el an3lisis del sistema es el asociado al propio variador, ya que es este el elemento que determina el contenido de potencia reactiva y la calidad de la corriente absorbida desde la red. Finalmente, adoptando una postura conservadora, se asume un factor de potencia de 0,95. Entonces, la potencia admisible resulta:

$$S_2 = \frac{2494,6 [kW]}{0,95} \simeq 2626 [kVA] \quad (58)$$

Se procede a calcular K2:

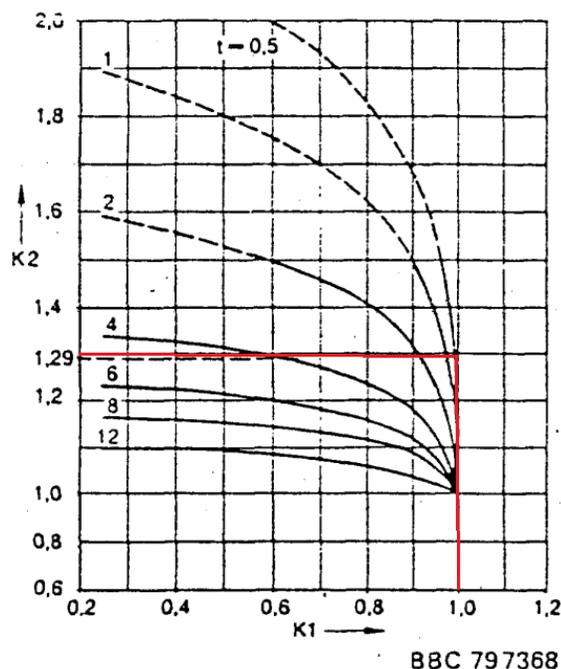
$$K2 = \frac{2626 [kVA]}{2000 [kVA]} = 1,31 < 1,5 \quad (59)$$

Se verifica que K2 es menor a 1,5.

Para determinar K1 se requiere conocer la condici3n de carga previa al intervalo de sobrecarga. Dado que la demanda presenta variaciones continuas, el valor de K1 tambi3n cambia en el tiempo. Las curvas de Brown Boveri (VDE 0536) est3n definidas para $0 \leq K1 \leq 1$; por lo tanto, a efectos de verificaci3n se adopta el caso conservador $K1 = 1$, equivalente a suponer que el transformador ingresa al tramo bajo condici3n nominal.

A partir de K1 y K2 se determina el tiempo de sobrecarga admisible seg3n las curvas BBC:

Figura 58



Nota. Curvas de sobrecargabilidad para transformadores con refrigeración ONAN.

En los escenarios más exigentes evaluados, el transformador admite sobrecargas durante 0,5 [h] (30 [min]) sin superar los límites térmicos considerados. Dado que la carga real fluctúa en todo momento y los picos no son sostenidos, no se espera que las solicitaciones superen los tiempos admisibles de sobrecarga. Bajo las condiciones de operación y supuestos térmicos adoptados, la instalación de un transformador de 2 [MVA] resulta técnicamente viable y adecuada para el perfil de carga analizado.

Se optó por la selección de un transformador trifásico de potencia del tipo inmerso en aceite, dado que este tipo de unidades resulta más adecuado para aplicaciones industriales y en exteriores, principalmente por su elevada capacidad de disipación térmica y su construcción robusta, lo que favorece una mayor confiabilidad operativa. Adicionalmente, el aspecto económico constituye un factor relevante: a igual nivel de potencia y tensión, los transformadores secos presentan un costo superior y un mayor volumen, lo que puede representar una desventaja en términos de espacio e inversión inicial.

A continuación se adjunta la hoja de datos del transformador:

Figura 59

Norma	IEC		
CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE			
Instalación	A la intemperie		
Altitud de operación	1000		[m]
Atmósfera	No agresiva		
Temperatura máxima del ambiente	40		[°C]
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS			
Potencia	2000		[kVA]
Número de Fases	3		
Frecuencia	50		[Hz]
Alta Tensión AT	33		[kV]
Nivel de aislamiento AT	36		[kV]
Cambiador de derivaciones AT	CST ($\pm 2 \times 2,5\%$)		
Conexión AT	Delta		
BIL de AT	170		[kV]
Baja Tensión BT	6,6		[kV]
Nivel de aislamiento BT	7,2		[kV]
Conexión BT	Estrella		
BIL de BT	60		[kV]
Grupo de conexión	YNd1		
Impedancia @75°C	6		[%]
Pérdidas en vacío @75°C	5,2		[kW]
Pérdidas en carga @75°C	26,4		[kW]
Nivel de ruido ONAN	65		[dB]
Enfriamiento	ONAN		
Clase material aislante	E - (120°C)		
Incremento de Temperatura (aceite/devanado)	65/65		

Nota. Hoja de datos de transformador trifásico de potencia en aceite de 2 [MVA] de la marca WEG.

Para un transformador de 2000 [kVA] con las características indicadas, el peso típico se ubica en el rango de 5200 - 5800 [kg]. A efectos de diseño y como criterio conservador, se adopta el extremo superior del rango.

Celdas de MT

Con el fin de dar cumplimiento a los requerimientos establecidos por la empresa distribuidora, se dispone la instalación de un sistema de celdas de media tensión, en este caso provisto por la empresa Ormazábal. Para ello, se recurrió al catálogo oficial de la gama Ormazabal cgm.3, correspondiente a celdas modulares compactas con aislamiento en gas SF_6 , diseñadas para instalaciones exteriores, con elevada resistencia a la corrosión y aptas para tensiones de hasta 40,5 [kV] (IEC) / 38 [kV] (IEEE). “Las celdas de exterior cgm.3 están diseñadas para ser instaladas a la intemperie, en condiciones de servicio, con polución, condensación y radiación solar, entre otras, definidas en las condiciones normales de servicio de exterior, según IEC 62271-1 o IEEE C37.20.9.” (Ormazabal, s.f.). Esta alternativa se considera la más apropiada desde el punto de vista tecnológico para su aplicación en subestaciones móviles destinadas a operar en entornos exigentes como el de Vaca Muerta.

En primer lugar, se requiere una celda destinada a la entrada de la acometida de 33 [kV] proveniente de la red de distribución. El modelo cgm.3-rc incorpora un módulo de remonte con interruptor-seccionador de carga y puesta a tierra, diseñado para garantizar la maniobra y el seccionamiento seguro del cable de acometida. Su función principal es recibir la alimentación desde la distribuidora y transferirla al embarrado de media tensión de la subestación móvil, permitiendo además la desconexión del sistema en situaciones de mantenimiento o contingencia.

Figura 60

Características eléctricas		IEC				ANSI/IEEE
Tensión asignada	U_n [kV]	36	38,5	40,5	38	38
Frecuencia asignada	f_n [Hz]	50/60	50	60	50	60
Corriente asignada						
Línea	I_n [A]	400/630	630			600
Clasificación arco interno	IEC 62271-200 IAC	AF/AFL 20* kA 1 s/25 kA 1 s AFL(R) 16 kA 1 s / 20 kA 1 s / 25 kA 1 s	AFL 20* kA 1 s/25 kA 1 s	AFL 20* kA 1 s/25 kA 1 s	-	
	IEEE C37.20.7:2017	-	-	-	Tipo 2B, 25 kA, 1 s	

* Ensayos realizados a 21 kA/52,5 kA
Valores para 50 Hz

Nota: Características eléctricas de celda de remonte cgm.3-rc.

Figura 61



Nota: Características dimensionales de celda de remonte cgm.3-rc.

En segundo lugar, la normativa de las empresas distribuidoras establece la obligatoriedad de disponer de un punto de medición de energía en media tensión. Con este propósito se selecciona la celda cgm.3-m, diseñada para alojar transformadores de corriente y de tensión, los cuales permiten realizar tanto la medición destinada a la facturación como la provisión de señales para los sistemas de protección.

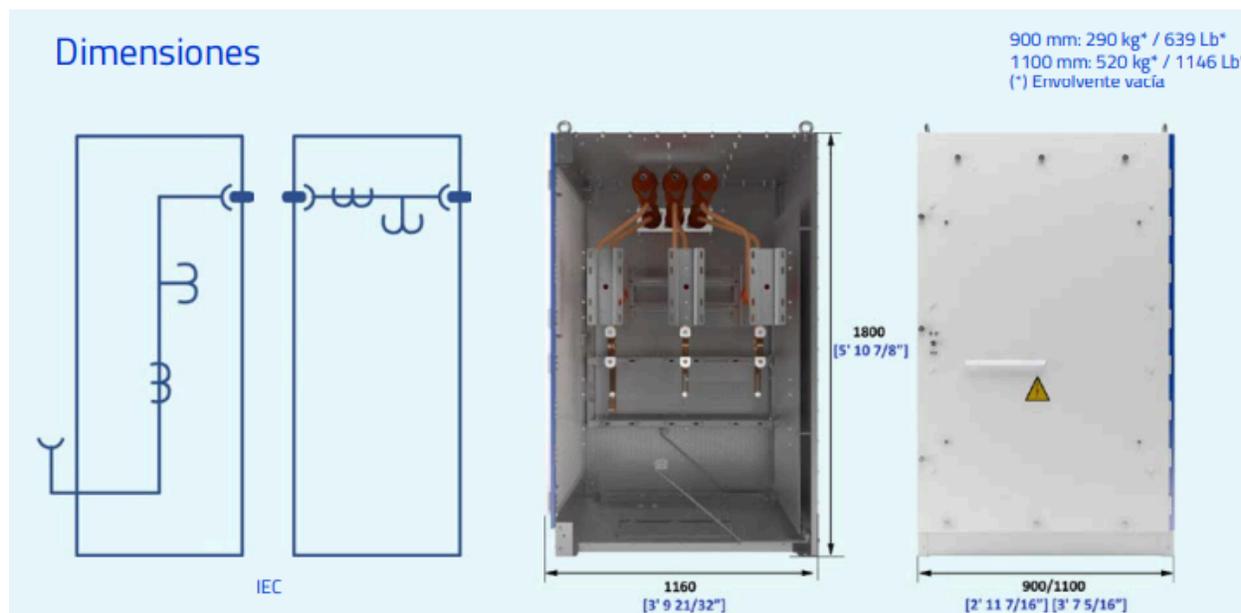
Figura 62

Características eléctricas		IEC					
Tensión asignada	U_n [kV]	36		38,5		40,5**	
Frecuencia asignada	f_n [Hz]	50	60	50	60	50	60
Corriente asignada							
Interconexión general de embarrado y celdas	I_n [A]	400/630		630		630	
Tensión asignada de corta duración soportada a frecuencia industrial (1 min)							
Fase a tierra y entre fases	U_d [kV]	70		80		95	
Tensión soportada asignada a impulso tipo rayo							
Fase a tierra y entre fases	U_p [kV]	170		180		185	
Clasificación arco interno		IAC AFL 16 kA 0,5 s/20* kA 0,5 s/16 kA 1 s/20 kA 1 s					
Corriente admisible asignada de corta duración Valor $t_c = (x)$ s	I_c [kA]	16/20* (1/3 s) / 25 (1 s)		16/20 (1/3 s) 25 (1 s)		16/20 (1/3 s) 25 (1 s)	

* Ensayos realizados a 21 kA/52,5 kA ** Consultar a Ormazabal para opción de 40,5 kV
Valores para 50 Hz

Nota: Características eléctricas de celda de medida cgm.3-m.

Figura 63



Nota: Características dimensionales de celda de medida cgm.3-m.

La protección del transformador debe contemplar eventuales fallas por sobrecorriente, cortocircuito y falla a tierra, garantizando al mismo tiempo una adecuada coordinación selectiva con el sistema de la empresa distribuidora. Dado que se dispone de un transformador de 2.000

[kVA], se optó por seleccionar las celdas CGM.3-p equipadas con fusibles. No obstante, es importante recordar que su aplicación se encuentra limitada precisamente a transformadores de hasta 2.000 [kVA], tal como se expone en la siguiente figura.

Figura 64

Selección de fusibles HHD según las normas IEC														
U. Red [kV]	Potencia asignada del transformador sin sobrecarga [kVA]													
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
	Intensidad asignada del fusible IEC 60282-1 [A]													
25	6,3	10	16	16	16	16	20	31,5	31,5	40	40	50	63	80*
30	6,3	6,3	10	16	16	16	20	20	31,5	31,5	40	40	63	63
35/36	6,3	6,3	10	16	16	16	20	20	31,5	31,5	40	40	50	63

Nota: Intensidad asignada del fusible de las celdas cmg.3-p.

En base a lo indicado en la figura anterior, se determinó una intensidad asignada del fusible de 63 [A]. Luego, se adjuntan las características de estas celdas en la siguiente figura:

Figura 65

Características eléctricas			IEC						ANSI/IEEE	
Tensión asignada	U_n [kV]		36		38,5		40,5		38	
Frecuencia asignada	f_r [Hz]		50	60	50	60	50	60	50	60
Corriente asignada										
Interconexión general de embarrado y celdas	I_r [A]		400/630		630		630		600	
Línea	I_r [A]		200						200	
Tensión asignada de corta duración soportada a frecuencia industrial (1 min)										
Fase a tierra y entre fases	U_d [kV]		70		80		95		70	
A través de la distancia de seccionamiento	U_d [kV]		80		90		118		77	
Tensión soportada asignada a impulso tipo rayo										
Fase a tierra y entre fases	U_p [kV]		170		180		185		150	
A través de la distancia de seccionamiento	U_p [kV]		195		210		215		165	
Clasificación arco interno	IEC 62271-200 IAC		AF/AFL 16 kA 1 s/ 20* kA 1 s/25 kA 1 s AFLR** 16 kA 1 s/ 20* kA 1 s/25 kA 1 s		AF/AFL 20* kA 1 s/25 kA 1 s AFLR** 20* kA 1 s/25 kA 1 s		AF/AFL 20* kA 1 s/25 kA 1 s AFLR** 20* kA 1 s/25 kA 1 s		-	
	IEEE C37.20.7:2017		-		-		-		Tipo 2B, 25 kA, 1 s	
Interruptor-seccionador			IEC 62271-103 + IEC 62271-102						IEEE C37.74	
Corriente admisible asignada de corta duración (circuito principal)										
Valor $t_{cr} = (x)$ s	I_k [kA]		16/20* (1/3 s) / 25 (1 s)		20* (1/3 s)/25 (1 s)				20* (1/3 s)/25 (1 s)	
Valor de pico	I_p [kA]		40/50*/62,5	41,6/52,5*/65	52*/62,5	52*/65	52*/62,5	52*/65	52,5/62,5	54,6/65
Poder de corte de corriente principalmente activa	I_1 [A]		200		200				200	
Poder de cierre del interruptor principal (valor de pico)	I_{ma} [kA]		40/50*/62,5	41,6/52,5*/65	52*/62,5	52*/65	52*/62,5	52*/65	52,5/62,5	54,6/65
Categoría del interruptor										
Endurancia mecánica			1000-M1						1000	
Ciclos de maniobras (cierres en cortocircuito)- clase			5-E3		3-E2 en 20 kA/5-E3 en 25 kA				3	
Corriente de intersección combinado interruptor - relé (ekor.rpt)										
I_{max} de corte según acc. TD ₉₅ IEC 62271-105	[A]		490						n/a	
Corriente de transferencia combinado interruptor-fusible										
I_{max} de corte según acc. TD _{transfer} IEC 62271-105	[A]		820		700		700		n/a	
Seccionador de puesta a tierra			IEC 62271-102						IEEE C37.74	
Corriente admisible asignada de corta duración (circuito de tierra)										
Valor $t_{cr} = 1$ s	I_k [kA]		1/3,15						1/3,15	
Valor de pico	I_p [kA]		2,5/7,8	2,6/8,2	2,5/7,8	2,6/8,2	2,5/7,8	2,6/8,2	2,5/7,8	2,6/8,2
Poder de cierre del seccionador de puesta a tierra (valor de pico)	I_{ma} [kA]		2,5	2,6	2,5	2,5	2,6	2,5	2,6	
Categoría del seccionador de puesta a tierra										
Endurancia mecánica			1000-M0***						1000	
Ciclos de maniobras (cierres en cortocircuito)- clase			5-E2 2-E1 para 7,8 u 8,2 kA						3	

* Ensayos realizados a 21 kA/52,5 kA

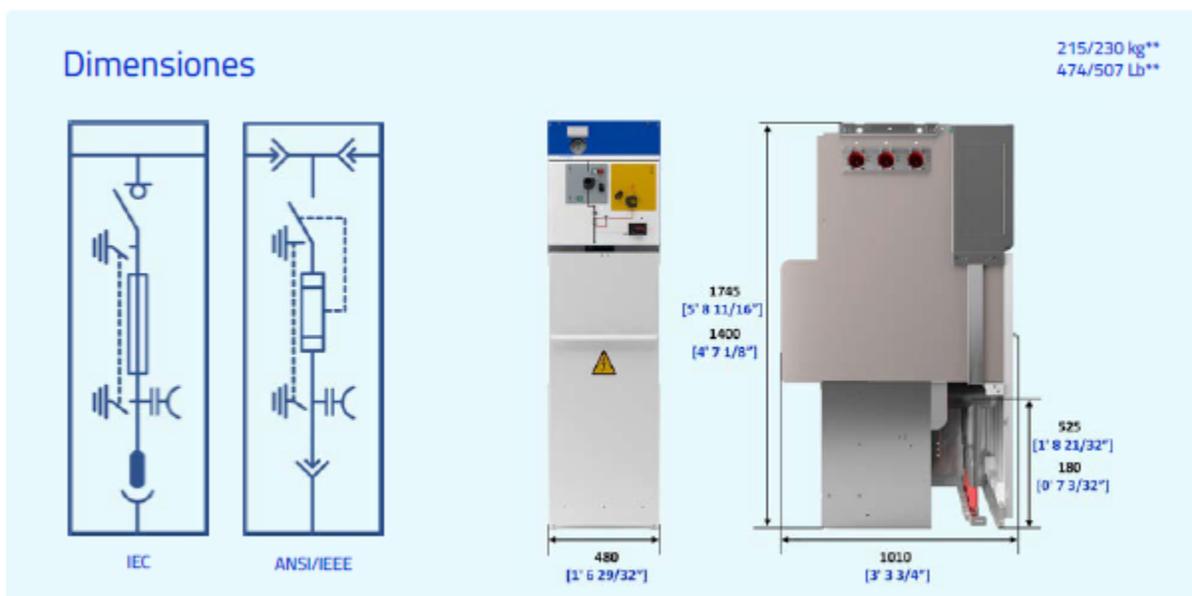
** Con salida de gases a través de chimenea

*** En opción, 2000-M1

Valores para 50 Hz

Nota: Características eléctricas de los equipos de la celda cgm.3-p.

Figura 66



Nota: Características dimensionales de celda de medida cgm.3-p.

De esta manera, el conjunto de celdas conforma una unidad compacta, segura y de fácil ampliación, en la cual la energía ingresa a través de la celda cgm.3-rc, se deriva hacia la cgm.3-m para su medición y, finalmente, se protege mediante la cgm.3-p.

Verificación mecánica del carretel

Flexión tambor

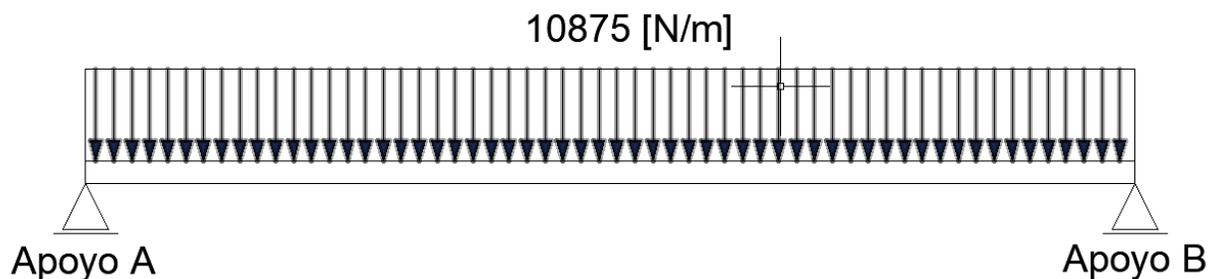
Para analizar el esfuerzo de flexión en el tambor, se consideró que el peso del cable actúa como una carga uniformemente distribuida a lo largo del ancho del carretel. El tambor se comporta como una viga simplemente apoyada, es decir, con apoyos en los extremos. Por lo tanto:

$$q = \frac{W}{L} \quad (60)$$

Donde W es el peso del cable y L el ancho del carretel. Entonces:

$$q = \frac{2549,7 \text{ [kg]} * 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}}{2,3 \text{ [m]}} = 10875 \text{ [N/m]} \quad (61)$$

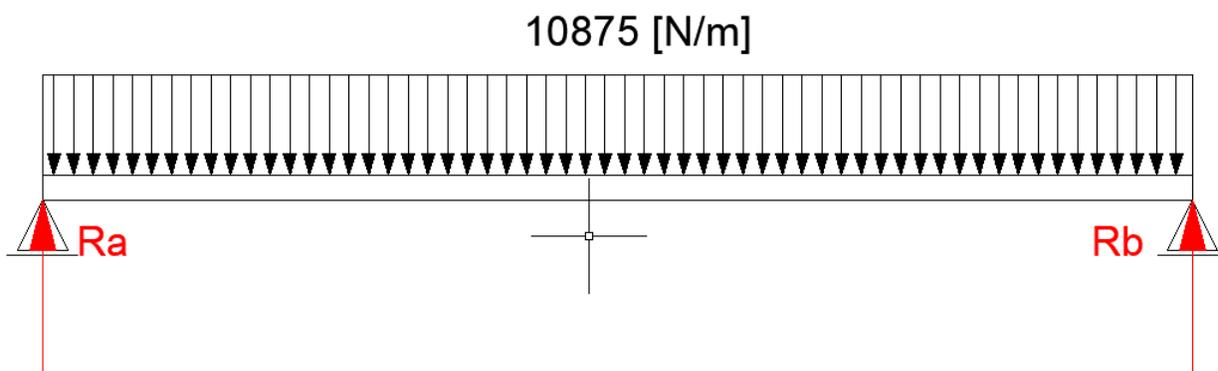
Figura 67



Nota: Diagrama esquemático del comportamiento del tambor.

A continuación, mediante la Figura 68 que esquematiza las reacciones en los apoyos, se plantearon las ecuaciones de equilibrio estático —sumatoria de fuerzas y momentos igual a cero— con el fin de garantizar la estática del sistema.

Figura 68



Nota: Diagrama de las reacciones en los apoyos.

(62)

$$\sum F_y = Ra + Rb - q * L = 0$$

(63)

$$\sum M_A = - q * \frac{L^2}{2} + Rb * L = 0$$

Despejando, se obtienen los siguientes valores:

(64)

$$Rb = q * \frac{L}{2} = 12506 [N]$$

(65)

$$Ra = q * \frac{L}{2} = 12506 [N]$$

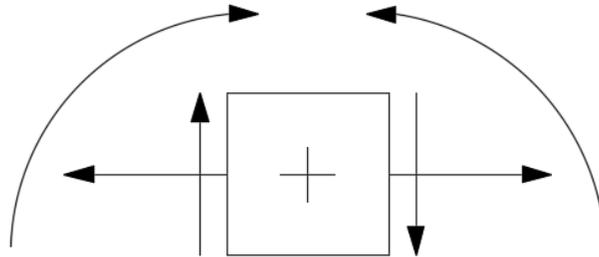
A partir de lo calculado previamente, se obtiene la función del corte mediante la siguiente integral:

(66)

$$Q(x) = - \int q(x) dx = - q * x + Ra = - 10875 * x + 12506$$

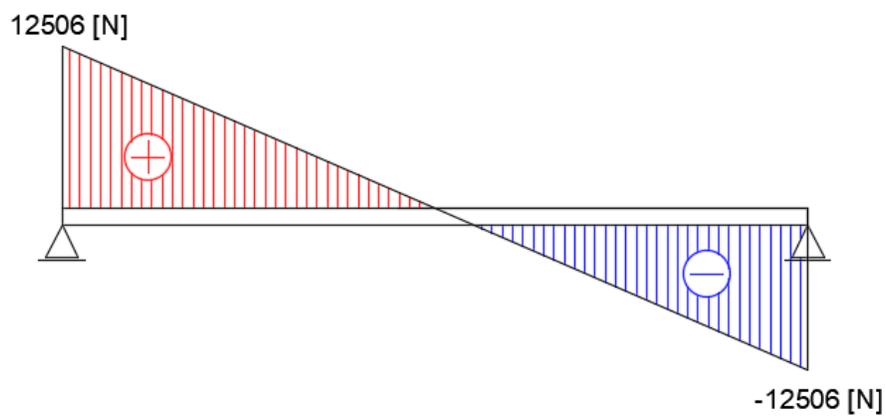
Con el apoyo del siguiente sistema de referencia y de la función de corte obtenida anteriormente, se procedió a graficar la distribución del esfuerzo de corte a lo largo del tambor.

Figura 69



Nota: Sistema de referencia para obtener los diagramas de esfuerzos en el tambor.

Figura 70



Nota: Diagrama de esfuerzo de corte.

Seguidamente, se realizó el mismo procedimiento para el momento flector. Por lo tanto, integrando el esfuerzo de corte, se obtuvo:

$$M(x) = \int Q(x)dx = \frac{-q \cdot x^2}{2} + Ra \cdot x = -5437,5x^2 + 12506x \quad (67)$$

Para encontrar el máximo se deriva la función anterior y se la iguala a cero.

$$\frac{dM(x)}{dx} = -10875x + 12506 = 0 \quad (68)$$

Despejando resulta:

$$x = 1,15 \text{ [m]} \quad (69)$$

Y reemplazando en la función del momento flector, se obtiene el valor máximo:

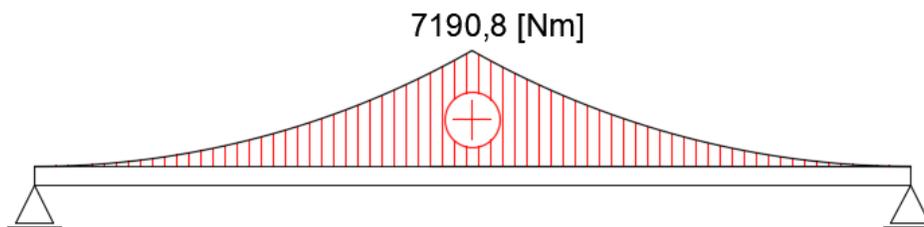
$$M(1,15) = -5437,5 * 1,15^2 + 12506 * 1,15 = 7190,8 \text{ [Nm]} \quad (70)$$

Seguido a esto, se verifica que el momento flector en el apoyo B sea igual a cero:

$$M(2,3) = -5437,5 * 2,3^2 + 12506 * 2,3 = 0 \text{ [Nm]} \quad (71)$$

Con los valores obtenidos anteriormente y la función, se procedió a graficar la distribución del esfuerzo de corte a lo largo del tambor.

Figura 71



Nota: Diagrama de esfuerzo de flexión.

Dado que el tambor es un cilindro hueco, se utilizó la fórmula para calcular las tensiones normales inducidas por el momento flector.

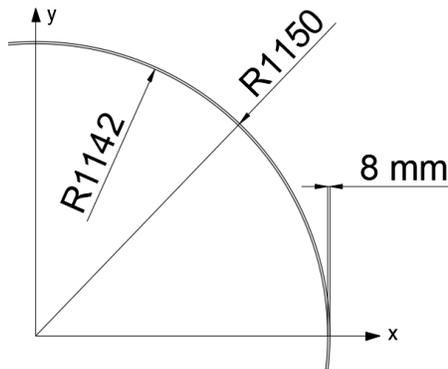
$$\sigma = \frac{M.c}{I} \quad (72)$$

Donde:

- M : momento flector
- c : distancia desde la fibra neutra hasta la externa
- I : momento de inercia

A partir de la figura siguiente, se determinó el momento de inercia de la sección transversal del tambor, considerando que por simetría los ejes x e y tienen el mismo valor.

Figura 72



Nota: Sección transversal del tambor con sus respectivas dimensiones.

$$I_{xx} = I_{yy} = I_r = \frac{\pi}{4} * (R_{ext}^4 - R_{int}^4) \quad (73)$$

$$I_r = \frac{\pi}{4} * ((1,150[m])^4 - (1,142[m])^4) = 0,0378 [m^4] \quad (74)$$

Posteriormente, utilizando el valor máximo del momento flector junto con el momento de inercia y el radio externo del cilindro, se calculó la tensión de trabajo del tambor mediante la fórmula de flexión.

$$\sigma_{trabajo} = \frac{7190,8 [Nm] * 1,15 [m]}{0,0378 [m^4]} = 218767 \left[\frac{N}{m^2} \right] = 0,218 [MPa] \quad (75)$$

A partir de un acero AISI 304, se obtuvo su tensión de fluencia y se lo afectó por un coeficiente de seguridad (1,5) con el objetivo de estar un 50% por debajo de la fluencia del material.

Figura 73

Tipo Acero	Rango de dimensiones	Límite Elástico 0,2% (R _{p0,2}) min. N/mm ²	Resistencia a la tracción (R _m) N/mm ²	Elongación (A ₅) min. %
304	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 230	540 - 750	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 210	520 - 720	≥ 45
304L	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 220	520 - 670	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 200	520 - 670	≥ 45

Nota: Propiedades mecánicas del acero inoxidable a temperatura ambiente.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{C.F} = \frac{\sigma_f}{1,5} = \frac{210 [MPa]}{1,5} = 140 [MPa] \quad (76)$$

Se cumple que $\sigma_{adm} \geq \sigma_{trabajo}$. La tensión generada es muy baja respecto a la tensión admisible adoptada.

Pandeo

Luego, para el análisis del pandeo, el tambor se modela como un cilindro delgado bajo presión externa uniforme, lo que se aproxima al caso del peso del cable ejerciendo fuerza radial sobre toda la superficie interna del tambor.

Al suponer que el cable ejerce su peso como una carga distribuida sobre el área lateral del cilindro, el área resulta:

$$A = 2\pi Ra = 2\pi * 2,3[m] * 2,3[m] = 33,22[m^2] \quad (77)$$

Y la presión de trabajo es:

$$p_{trabajo} = \frac{F}{A} = \frac{2549,7 [kg] * 9,81 [m/s^2]}{33,22 [m^2]} = 752,9 [Pa] \quad (78)$$

De la misma forma que se extrajo la tensión de fluencia del AISI 304, se hizo con su módulo de la elasticidad.

Figura 74

20°C	100° C	200°C	300° C	400°C	500° C
200	194	186	179	172	165

Nota: Módulo de elasticidad en función de la temperatura.

A partir del libro Theory of Elastic Stability, se extrajo la siguiente ecuación:

$$p_{cr} = \frac{2Et^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}*R^2} = \frac{2 * 200000 [N/mm^2] * (8[mm])^2}{\sqrt{3(1-0,3^2)}*(2300[mm])^2} \quad (79)$$

Resultando:

$$p_{cr} = 2,93 \left[\frac{N}{mm^2} \right] = 2,93 [MPa] \quad (80)$$

Se cumple que $p_{cr} \geq p_{trabajo}$. Se concluye que con el diseño de tambor adoptado no hay riesgo de pandeo.

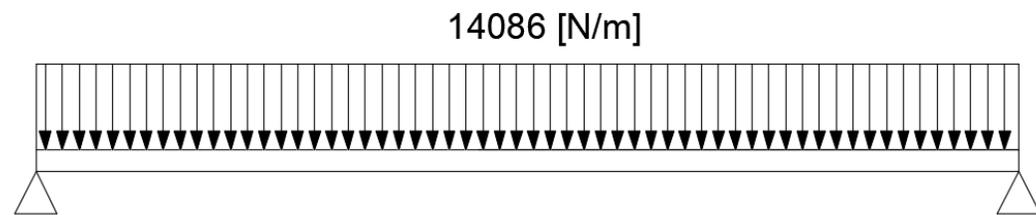
Flexión árbol central

El análisis del árbol central se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento aplicado al tambor, considerando una carga distribuida originada por el peso del cable, pero con la diferencia del aporte adicional del peso propio del tambor. Cabe destacar que la longitud del árbol analizado es mayor, dado que incluye los platos laterales del conjunto.

Entonces, la carga distribuida resulta:

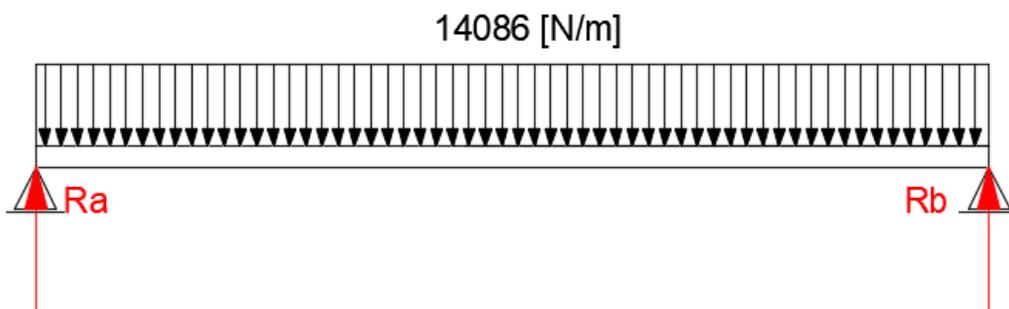
$$q = \frac{(2549,7 \text{ [kg]} + 1040 \text{ [kg]}) * 9,81 \text{ [m/s}^2]}{2,5 \text{ [m]}} = 14086 \text{ [N/m]} \quad (81)$$

Figura 75



Nota: Diagrama esquemático del comportamiento del tambor.

Figura 76



Nota: Diagrama de las reacciones en los apoyos.

Aplicando sumatoria de fuerzas y momentos iguales a cero para garantizar la estaticidad del sistema:

$$\sum F_y = Ra + Rb = q * L \quad (82)$$

$$\sum M_A = - q * \frac{L^2}{2} + Rb * L = 0 \quad (83)$$

Por lo tanto, las reacciones resultan:

$$Rb = q * \frac{L}{2} = 17607,5 [N] \quad (84)$$

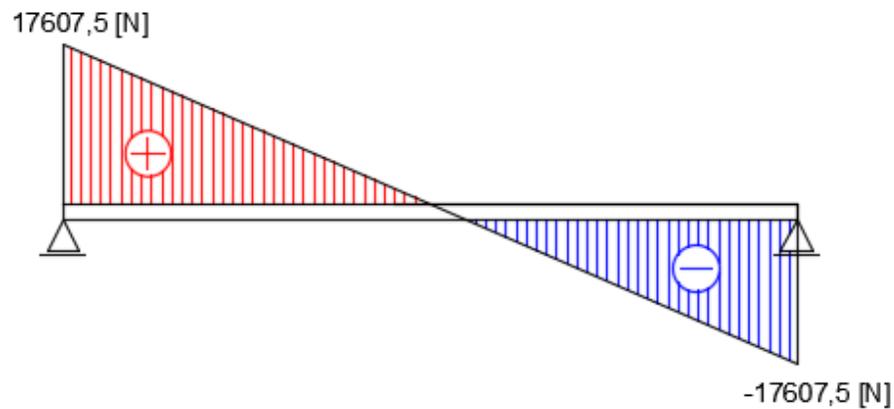
$$Ra = q * \frac{L}{2} = 17607,5 [N] \quad (85)$$

A partir de lo calculado previamente, se obtiene la función del corte mediante la siguiente integral:

$$Q(x) = - \int q(x) dx = - q * x + Ra = - 14086x + 17607,5 \quad (86)$$

Con el apoyo del siguiente sistema de referencia y de la función de corte obtenida anteriormente, se procedió a graficar la distribución del esfuerzo de corte a lo largo del tambor.

Figura 77



Nota: Diagrama de esfuerzo de corte.

$$M(x) = \int Q(x)dx = \frac{-q \cdot x^2}{2} + Ra \cdot x = -7043x^2 + 17607,5x \quad (87)$$

Para encontrar el máximo se deriva la función anterior y se la iguala a cero.

$$\frac{dM(x)}{dx} = -14086x + 17607,5 = 0 \quad (88)$$

Despejando resulta:

$$x = 1,25 [m] \quad (89)$$

Y reemplazando en la función del momento flector, se obtiene el valor máximo:

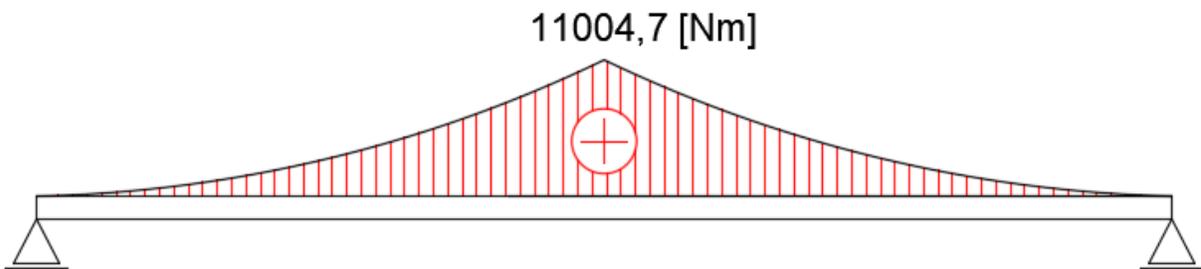
$$M(1,25) = -7043 \cdot 1,25^2 + 17607,5 \cdot 1,25 = 11004,7 [Nm] \quad (90)$$

Seguido a esto, se verifica que el momento flector en el apoyo B sea igual a cero:

$$M(2,5) = -7043 * 2,5^2 + 17607,5 * 2,5 = 0 \text{ [Nm]} \quad (91)$$

Con los valores obtenidos anteriormente y la función, se procedió a graficar la distribución del esfuerzo de corte a lo largo del tambor.

Figura 78



Nota: Diagrama de esfuerzo de flexión.

Seguidamente, se procedió a la selección de un tubo de acero con costura, cuya geometría y dimensiones se presentan en la figura siguiente.

Figura 79

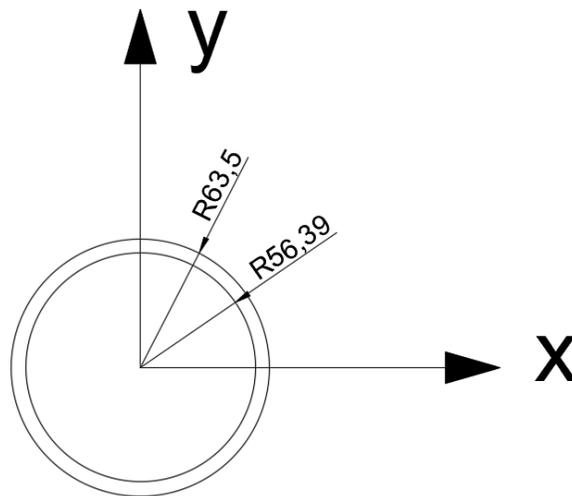
TUBOS REDONDOS		CUADRADO	RECTANGU LAR	0.50	0.55	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.25	1.40	1.50	1.60	1.80	2.00	2.50	2.85	3.20	4.00	4.75	5.15	5.50	6.35	7.11	8.00	
Pulgadas	mm																											
4 1/2"	114.30														4.447	4.994	5.539	6.893	7.833	8.768	10.881	12.833	13.863	14.757	16.905			
		90x90																										
		40x140														4.389	5.446	5.446	6.742	7.635	8.515	10.478	12.259	13.185	13.982	15.864	17.484	
		60x120														4.515	5.061	5.603	6.939	7.859	8.766	10.792	12.632	13.589	14.413	16.362		
		60x125														4.389	5.446	5.446	6.742	7.635	8.515	10.478	12.259	13.185	13.982	15.864	17.484	
		80x100													4.389	5.446	5.446	6.742	7.635	8.515	10.478	12.259	13.185	13.982	15.864	17.484		
5"	127.00													4.948	5.558	6.165	7.680	8.726	9.770	12.133	14.321	15.476	16.480	18.894	21.022	23.478		
		100x100																										
		50x150													4.892	5.485	6.074	7.527	8.530	9.519	11.734	13.750	14.802	15.709	17.858	19.716	21.817	
		60x140																										
		70x130																										
		80x120																										

Nota: Tabla de pesos teóricos [kg/m].

Se optó por utilizar un tubo de acero estructural de 5" (127 [mm]) de diámetro exterior y un espesor de 7,11 [mm]. Dicho tubo tiene un peso de 21,022 [kg/m].

A partir de la figura siguiente, se determinó el momento de inercia de la sección transversal del tambor, considerando que por simetría los ejes x e y tienen el mismo valor.

Figura 80



Nota: Sección transversal del eje con sus respectivas dimensiones.

$$I_{xx} = I_{yy} = I_r = \frac{\pi}{4} * (R_{ext}^4 - R_{int}^4) \quad (92)$$

$$I_r = \frac{\pi}{4} * ((0,0635[m])^4 - (0,05639[m])^4) \quad (93)$$

$$I_r = 4,83 \times 10^{-6} [m^4] \quad (94)$$

Posteriormente, utilizando el valor máximo del momento flector junto con el momento de inercia y el radio externo del cilindro, se calculó la tensión de trabajo del árbol mediante la fórmula de flexión usada anteriormente en el cálculo de flexión del tambor.

$$\sigma_{trabajo} = \frac{11004,7 [Nm] * 0,0635 [m]}{4,83 \times 10^{-6} [m^4]} = 144,7 \times 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (95)$$

Resultando:

$$\sigma_{trabajo} = 144,7 [MPa] \quad (96)$$

A partir de un acero estructural, se obtuvo su tensión de fluencia y se lo afectó por un coeficiente de seguridad con el objetivo de estar un 50% por debajo de la fluencia del material.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{C.F.} = \frac{\sigma_f}{1,5} = \frac{240 [MPa]}{1,5} = 160 [MPa] \quad (97)$$

Se cumple que $\sigma_{adm} \geq \sigma_{trabajo}$.

Verificación tráilers

Tal como se expuso a lo largo del informe, la solución propuesta se compone de dos equipos móviles, en los cuales los tráilers (o remolques) constituyen un elemento fundamental, dado que actúan como la estructura portante del resto de los componentes. En este sentido, resulta necesario definir qué es un tráiler y describir cuáles son sus principales componentes.

“Un semi tráiler es un tipo de tráiler que se acopla a un camión o tractor y se utiliza para transportar mercancías. Consta de varias partes que trabajan en conjunto para garantizar el transporte seguro y eficiente de la carga:

- Chasis: El chasis de un semi tráiler proporciona soporte estructural y sirve de base para todos los demás componentes. Generalmente está fabricado con acero de alta resistencia y está diseñado para soportar cargas pesadas y las condiciones de la ruta. Los chasis pueden ser playos o pueden tener cuello de cisne.
- Ejes: Los ejes son una parte esencial de un semi tráiler y se encargan de soportar el peso de la carga. La mayoría de los semi tráilers tienen varios ejes para distribuir el peso uniformemente y mejorar la estabilidad. Suelen estar equipados con sistemas de suspensión neumática para una conducción suave. Existen diferentes tipos de ejes utilizados en semi tráiler, según el uso previsto y la capacidad de carga. Algunos tipos comunes son:
 - Eje único: La configuración de un solo eje consta de un eje y dos ruedas. Este tipo de eje se utiliza comúnmente en tráilers pequeños que transportan cargas más ligeras.
 - Eje tándem: La configuración de eje tándem consta de dos ejes y cuatro ruedas. Esta configuración proporciona una mejor distribución del peso y

estabilidad, lo que la hace ideal para tráilers más grandes y cargas más pesadas.

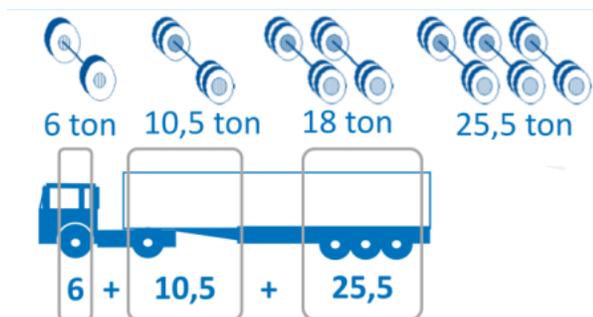
- Tri-eje: Una configuración tri-eje consta de tres ejes y seis ruedas. Esta configuración se utiliza comúnmente en tráilers de servicio pesado que transportan cargas excepcionalmente pesadas.
- Tren de aterrizaje (patas mecánicas): El tren de aterrizaje se utiliza para soportar el peso del semi tráiler cuando no está acoplado a un camión o tractor. Consta de dos patas que pueden extenderse y retraerse manual o mecánicamente. El tren de aterrizaje también incluye una manivela para facilitar su manejo. Se trata de una pata conducida y una conductora, y tienen una capacidad estática de entre 70 y 90 toneladas.
- Perno rey (king pin): El perno rey es el mecanismo que conecta el semi tráiler al camión o tractocamión. Permite la transferencia de potencia y proporciona una fijación segura entre ambos vehículos. La mayoría de los semi tráilers utilizan un sistema de acoplamiento de quinta rueda. El perno rey debe estar firmemente fijado y lubricado adecuadamente para evitar que se separe o que el remolque se vuelva inestable.
- Sistema de suspensión: El sistema de suspensión de un semi tráiler está diseñado para absorber impactos y vibraciones, proporcionando una conducción más suave y reduciendo el impacto en la carga. Puede ser suspensión mecánica o neumática (más común hoy en día).
- Sistema de frenos: El sistema de frenos de un semi tráiler es crucial para garantizar la seguridad vial. Incluye tanto los frenos de servicio, que se utilizan para la frenada normal, como los frenos de emergencia, que se activan en caso de una parada repentina o pérdida de control.

- Sistema ABS: El llamado ABS “Antilock Braking System” (sistema de frenado antibloqueo), consiste básicamente en evitar el bloqueo de las ruedas durante el frenado de la unidad y mejora la estabilidad y el control del vehículo. Esto es así porque sólo una rueda que gira, sin bloquearse, aprovecha al máximo la adherencia necesaria para mantener el control de la dirección y del vehículo, evitando el desplazamiento lateral; logrando además reducir la distancia de frenado. El bloqueo en las ruedas incrementa la distancia de frenado, elimina la capacidad de controlar la dirección y puede producir desplazamiento lateral.
- Luces y sistema eléctrico: Las luces y el sistema eléctrico de un semi tráiler garantizan la visibilidad y el correcto funcionamiento de todos los componentes esenciales. Esto incluye luces traseras, luces de freno, direccionales y una fuente de alimentación para accesorios como unidades de refrigeración.
- Llantas y neumáticos.” (Data Visual Expert, s.f.).

Como se mencionó en la sección del carretel, en Argentina, las dimensiones para los trailers que circulan por rutas nacionales están reguladas por la Ley Nacional de Tránsito N.º 24.449. En el artículo 53 de la mencionada ley de tránsito y en el anexo R de su Departamento Reglamentario 779/95 se fijan las dimensiones y los pesos máximos, y la relación potencia-peso mínima que rigen para el transporte de carga. En primer lugar, se deben definir algunos conceptos:

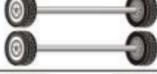
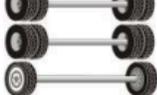
- “Peso bruto total combinado (PBTC) = total del peso transmitido a la calzada por el vehículo (cargado o vacío). Es la suma del peso del vehículo (tara= tractivo + arrastrado) más la carga.

- Peso por eje: cada configuración de ejes soporta un peso máximo. El daño causado al pavimento depende del peso por eje, no del PBTC. El peso máximo que soporta cada configuración se muestra a continuación:

Figura 81

Nota. Peso máximo que soporta cada configuración de ejes.

Figura 82

PESOS MÁXIMOS POR EJE		
Tipo de Eje	Esquema	Peso
Eje Aislado (Rodado simple: 1 Simple)		6,0 Ton.
Eje Aislado (Rodado dual: 1 Dual)		10,5 Ton.
Doble Eje (2 Simples)		10,0 Ton. (5,0 Ton. + 5,0 Ton.)
Doble Eje (1 Dual + 1 Simple)		14,0 Ton. (9,0 Ton. + 5,0 Ton.)
Doble Eje (2 Duales) *		18,0 Ton. (9,0 Ton. + 9,0 Ton.)
Triple Eje (2 Duales + 1 Simple)		21,0 Ton. (8,5 Ton. + 8,5 Ton. + 4,0 Ton.)
Triple Eje (3 Duales) **		25,5 Ton. (8,5 Ton. + 8,5 Ton. + 8,5 Ton.)

* Se considera Conjunto (Tandem) Doble de Ejes, cuando la distancia entre los centros de los mismos es mayor de un metro con veinte (1,20 m.) y menor de dos metros con cuarenta (2,40 m.).

** Se considera Conjunto (Tandem) Triple de Ejes, cuando la distancia entre sus centros extremos es mayor de dos metros con cuarenta (2,40 m.) y menor de cuatro metros con ochenta (4,80 m.).

Nota. Pesos máximos por eje.

- Potencia-peso: relación entre la potencia del vehículo automotor y el PBTC. Por ejemplo, para un tracto-camión de 360 [CV], y un PBTC de 42 [ton], la relación de potencia-peso resulta:

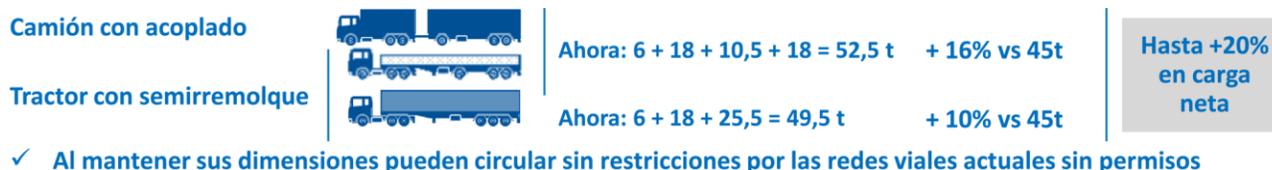
$$\text{relación potencia} - \text{peso} = \frac{360 \text{ [CV]}}{42 \text{ [ton]}} = 8,65 \left[\frac{\text{CV}}{\text{ton}} \right] \quad (98)$$

A mayor relación P-P: mejor circulación de vehículos pesados.

Antes, el PBTC máximo era de 45 toneladas, lo que desincentivaba motores potentes y configuraciones de más ejes (incrementaba la tara sin permitir más peso total, restando carga útil). Ahora, el PBTC máximo de cada vehículo es la suma del peso por eje según la configuración. Si la potencia lo permite, en algunas configuraciones se puede llevar más carga

manteniendo el peso transmitido a la calzada por eje, es decir sin daños adicionales al pavimento. A continuación se muestran ejemplos de configuraciones beneficiadas, que aumentan su PBTC máximo manteniendo las dimensiones:

Figura 83



Nota. Ejemplos de configuraciones beneficiadas.

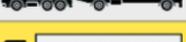
A partir del último cambio de normativa se buscan vehículos más seguros. Se establecieron también los siguientes ítems:

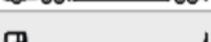
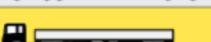
- Mayor potencia-peso mínimo progresivo de 4,25 [CV/ton] a 6 CV/ton en 2023. Mejor circulación: evita accidentes.
- Material remolcado: frenos ABS obligatorios en 0 [km] desde 2018, en adaptados desde 2020.
- Tractores: sistemas de freno antivuelco en unidades 0km a partir de 2022.

Se muestran a continuación las configuraciones de vehículos de libre circulación, junto con sus dimensiones máximas, peso máximo y relación potencia-peso (CV/ton) mínima:”

(Vialidad Nacional, s.f.).

Figura 84

Nº	TIPO DE VEHÍCULO	CONFIGURACIÓN Nº DE EJES				PESO MÁXIMO (t)	Relación POT./PESO (CV/t) mín.
			LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)		
1		S1 - D1	13,20	2,60	4,30	16,50	4,25
2		S1 - D2	13,20	2,60	4,30	24,00	4,25
3		S1 - D3	13,20	2,60	4,30	31,50	4,25
4		S2 - D2	13,20	2,60	4,30	28,00	4,25
5		S2 - D3	13,20	2,60	4,30	35,50	4,25
6		S1 - S1 - D2	13,20	2,60	4,30	30,00	4,25
7		S1 - S1 - D3	13,20	2,60	4,30	37,50	4,25
8		S1 - D1 - D1	18,60	2,60	4,30	27,00	4,25
9		S1 - D1 - D2	18,60	2,60	4,30	34,50	4,25
10		S1 - D1 - D3	18,60	2,60	4,30	42,00	4,25
11		S1 - D2 - D2	18,60	2,60	4,30	42,00	4,25
12		S1 - D2 - D1 - D1	18,60	2,60	4,30	45,00	4,25
			Distancia entre ejes del acoplado mayor a 2,40 m				
13		S1 - D2 - D3	18,60	2,60	4,30	49,50	6,00
14		S1 - D1 - D1 - D2	18,60	2,60	4,30	45,00	4,25

N°	TIPO DE VEHÍCULO	CONFIGURACIÓN N° DE EJES	DIMENSIONES MÁXIMAS			PESO MÁXIMO (t)	Relación POT./PESO (CV/t) mín.
			LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)		
15		S1-D1-D1-D1	18,60	2,60	4,30	45,00	4,25
16		S1-D1-D1-D1	20,00	2,60	4,30	37,50	4,25
17		S1-D1-D1-D2	20,00	2,60	4,30	45,00	4,25
18		S1-D2-D1-D1	20,00	2,60	4,30	45,00	4,25
19		S1-D2-D1-D2	20,00	2,60	4,30	52,50	6,00
20		S1-D1-D2-D2	20,00	2,60	4,30	52,50	6,00
21		S1-D1-D1-D1-D1	20,50	2,60	4,30	45,00	4,25
22		S1-D2-D2	22,40	2,60	4,30	42,00	4,25
23		S1-D2-D1-D1	22,40	2,60	4,30	45,00	4,25
24		S1-D2-D1-D2	18,60	2,60	4,30	52,50	6,00
25		S1-D2-D1-D1-D1	18,60	2,60	4,30	55,50	6,00
26		S1-D2-D2-D2	20,50	2,60	4,30	60,00	6,75
27		S1-D2-D2-D2	22,40	2,60	4,30	60,00	6,75

Bitrén

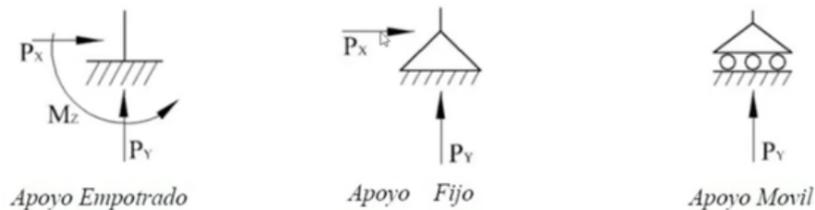
REFERENCIAS

■ NUEVA CONFIGURACIÓN	D1 EJE CON RODADOS DOBLES
S1 EJE CON RUEDAS INDIVIDUALES	D2 DOS EJES CON RODADOS DOBLES
S2 DOS EJES CON RODADOS INDIVIDUALES	D3 TRES EJES CON RODADOS DOBLES

Nota. Configuraciones de vehículos de libre circulación.

Para identificar la configuración más adecuada, es necesario en primer lugar llevar a cabo la verificación mecánica del chasis, el cual, como se señaló previamente, constituye el soporte estructural del tráiler y debe ser capaz de resistir el peso de todos los componentes. En este análisis, el chasis será modelado como una viga, es decir, un elemento estructural solicitado principalmente a flexión, cuya dimensión longitudinal resulta significativamente mayor que sus dimensiones transversales. Recordando los tipos de vínculo y sus respectivos grados de libertad:

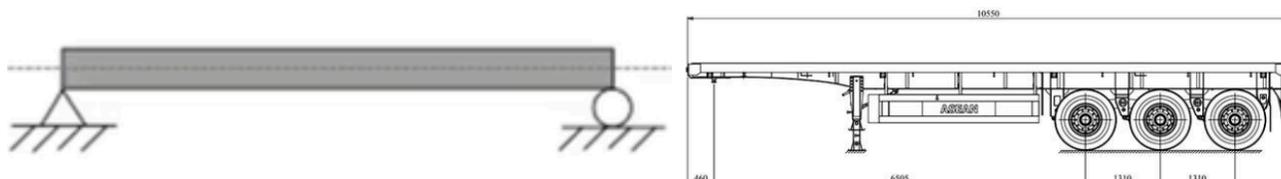
Figura 85



Nota. Tipos de apoyo.

Considerando que el chasis se vincula al camión por medio del perno rey, que debe estar fijo, y a la calzada por medio del tren rodante, resulta adecuado modelar el chasis como una viga con un apoyo fijo y otro móvil.

Figura 86



Nota. Apoyos del chasis.

A partir de la distribución de carga, se deben resolver las siguientes ecuaciones de resolución:

- Sumatoria de fuerzas igual a cero ($\Sigma F = 0$)
- Sumatoria de momentos respecto de cualquier punto del plano igual a cero ($\Sigma M = 0$)

Se tiene un doble objetivo: determinar la reacción en el perno rey (R_p) y la reacción en el tren rodante (R_t).

Para los cálculos se debe tener los datos del camión sobre el cual irá montado el semi trailer. Como referencia para ambos tráilers se va a considerar el tractor SCANIA G460 A6X4:

Figura 87



Nota. Tractor SCANIA G460 A6X4.

Como se observa, está formado por un eje simple y un doble eje (2 duales). A continuación, se adjuntan las capacidades técnicas y pesos máximos, provistos por el fabricante (el límite legal está determinado por la configuración de ejes y sus pesos máximos):

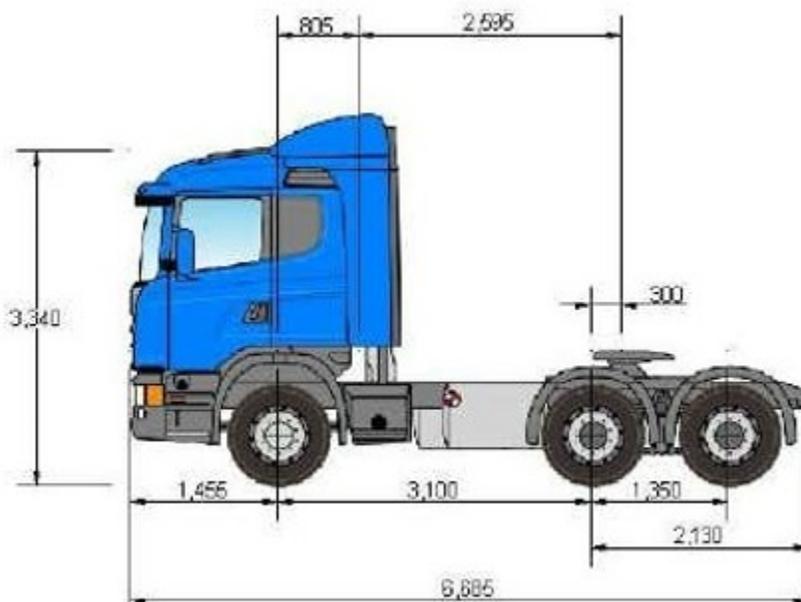
Tabla 6

	Eje Delantero	Eje Trasero	Total
Capacidad Técnica (kg)	7500	26000	33500
Límite Legal (kg)	6000	1800	7800
Pesos del Chasis (kg)	5340	4407	9747
Capacidad máxima de Tracción			78000 kg

Nota. Capacidades y pesos Tractor SCANIA G460 A6X4.

Por último, se adjunta una imagen con las dimensiones del tractor y las distancias de interés, ya que van a ser necesarias para el cálculo de los momentos:

Figura 88



Nota. Dimensiones Tractor SCANIA G460 A6X4.

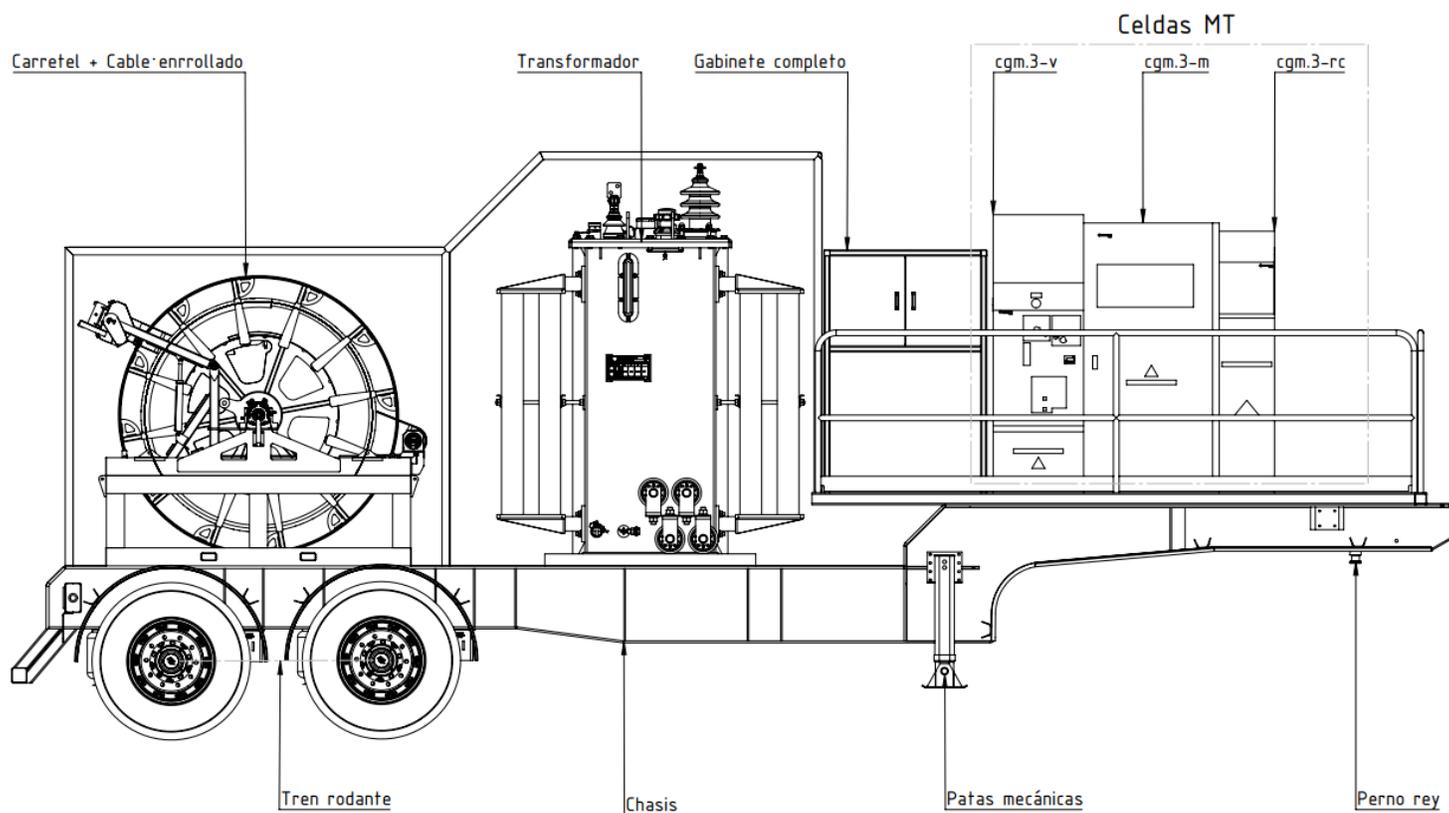
Las distancias de interés son las siguientes:

- *Distancia del eje delantero a perno trailer [mm] = 3100 [mm] + 300 [mm] = 3400 [mm]*
- *Distancia del eje delantero al centro del tándem [mm] = 3100 [mm] + $\frac{1350}{2}$ [mm] = 3775 [mm]*

Verificación estructural estación transformadora

Para llevar a cabo el análisis, se presenta a continuación una vista lateral de la estación transformadora que incluye sus principales componentes. Este esquema constituye una primera aproximación al diseño final del equipo y, aunque resulta útil para la distribución de cargas, la disposición de los distintos elementos podría modificarse a lo largo del desarrollo del proyecto por diversos factores. Asimismo, no se incluyen los circuitos auxiliares, los cables de conexión, los soportes ni otros elementos complementarios.

Figura 89



Nota. Vista lateral estación transformadora.

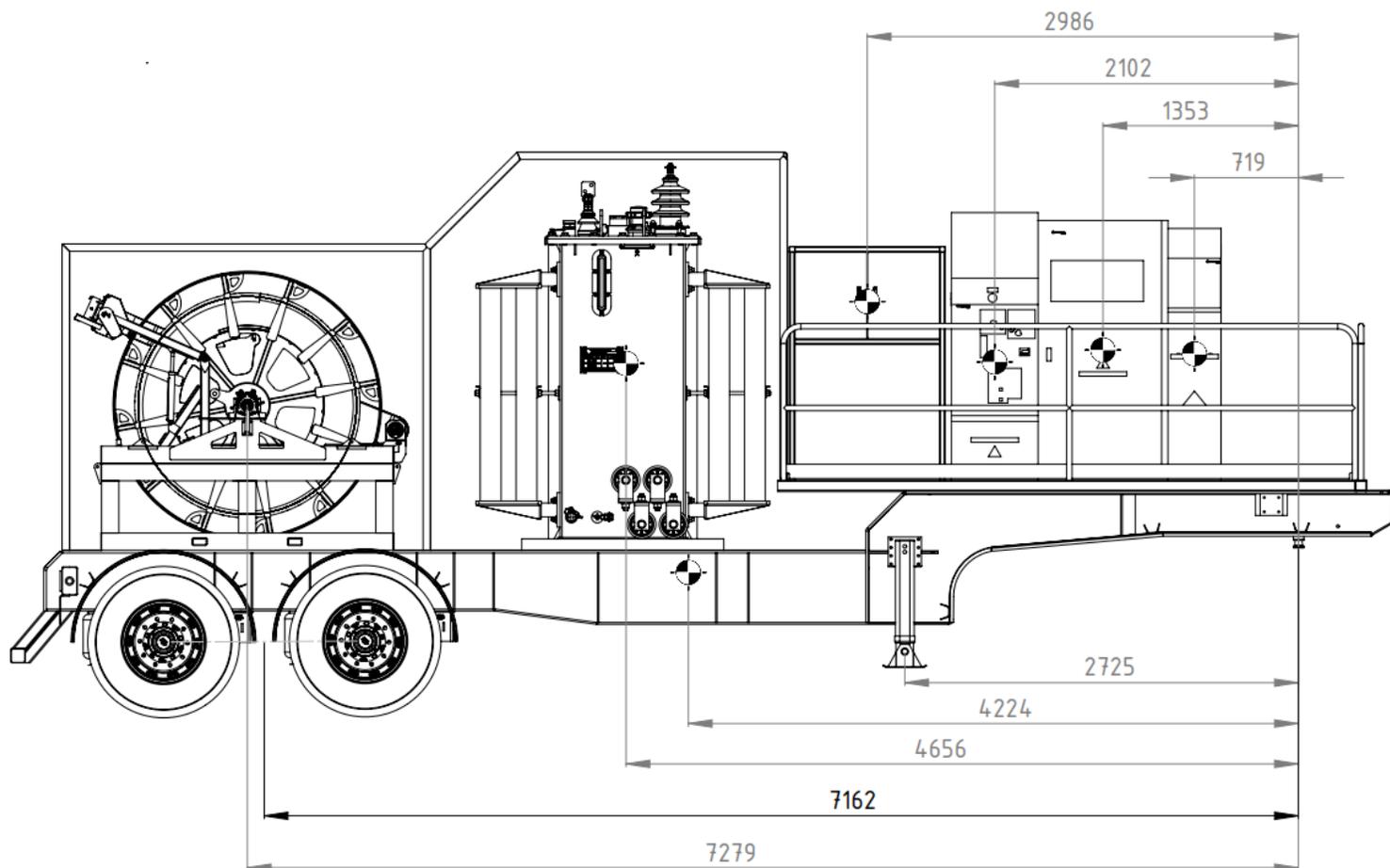
Los pesos de los componentes principales considerados en el análisis se enumeran a continuación. Dado que dichos valores son significativamente superiores a los correspondientes a los circuitos auxiliares, cables de conexión, soportes, barandas y otros elementos secundarios, resulta razonable despreciar el efecto de estos últimos para el desarrollo del estudio.

- Carretel con el cable enrollado: 4682 [kg]
- Transformador: 5800 [kg]
- Cgm.3-v: 255 [kg]
- Cgm.3-m: 520 [kg]

- Cgm.3-rc: 42 [kg]
- Chasis: 2178 [kg]
- Tren rodante (tándem 2 ejes): 2000 [kg]
- Patas mecánicas: 120 [kg]
- Gabinete completo MT (el que se observa en la imagen se utiliza únicamente de referencia para conocer la distancia al perno rey. En el modelo 3D se coloca un gabinete de media tensión con las dimensiones correctas): 500 [kg]

Luego, se deben determinar las distancias desde el centro de gravedad de cada carga (donde se aplica el peso) hasta el perno rey. Esto se hace gráficamente a partir del programa de diseño SolidWorks.

Figura 90



Nota. Distancia [mm] de cada componente al perno rey.

Mediante una planilla de excel se calcula la sumatoria de momentos respecto al perno rey.

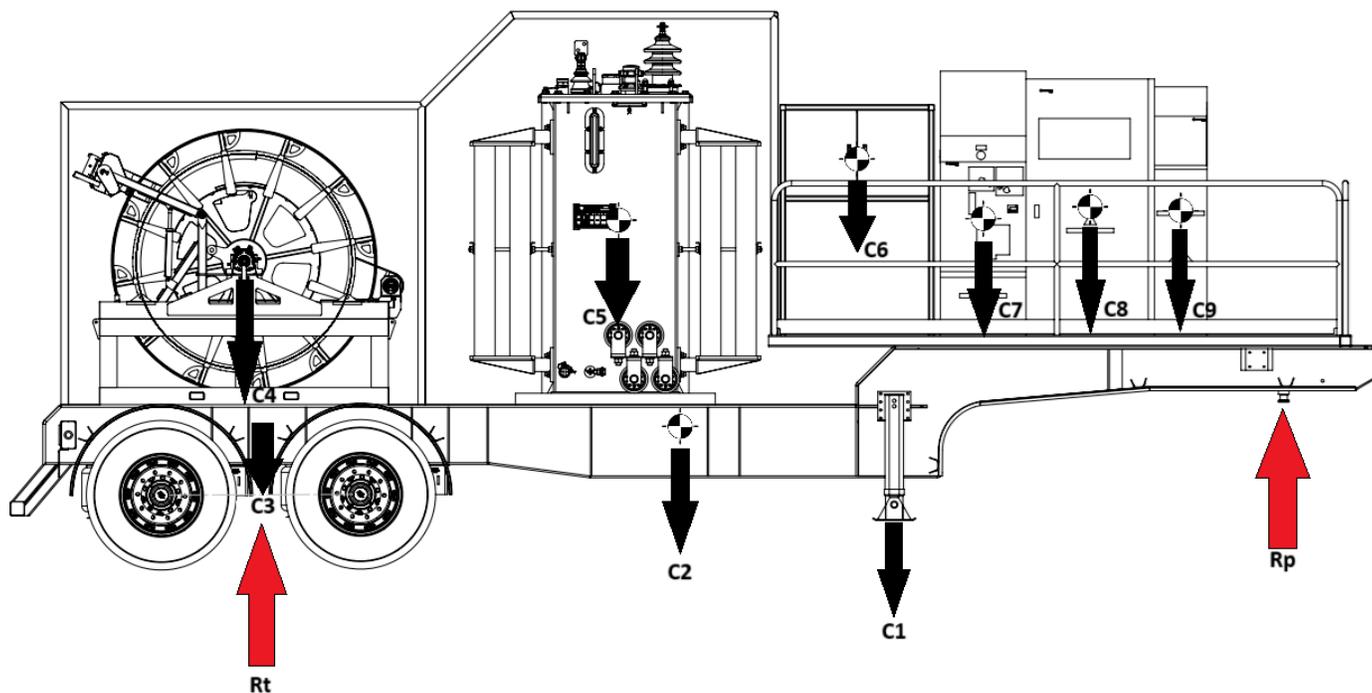
Tabla 7

Cargas	Descripción	Kgs	Distancia al Perno Rey (mm)	Momento (Kgmm)	%
C1	Carga patas mecánicas	120	2725	327000	0,37%
C2	Carga de chasis	2178	4224	9199872	10,49%
C3	Carga de tándem 2 ejes	2000	7162	14324000	16,33%
C4	Carga de carretel + cable	4682	7279	34080278	38,86%
C5	Carga de transformador	5800	4656	27004800	30,79%
C6	Carga del gabinete completo	500	2986	1493000	1,70%
C7	Carga de cgm3.v	255	2102	536010	0,61%
C8	Carga de cgm3.m	520	1353	703560	0,80%
C9	Carga de cgm3.rc	42	719	30198	0,03%
Totales	Tara (Kgs)	16097	Σ de Momentos (Kgmm)	87698718	100,00%

Nota. Sumatoria de momentos [kgmm] respecto al perno rey.

Una vez conocidos los momentos que producen los pesos de los distintos componentes, se procede a calcular las reacciones:

Figura 91



Nota. Cargas y reacciones.

En primer lugar, se determina la reacción en el tándem:

$$R_t * \text{distancia al perno rey} - \Sigma M_{\text{perno}} = 0 \quad (99)$$

$$R_t = \frac{\Sigma M_{\text{perno}}}{\text{distancia al perno rey}} = \frac{87698718 [k*gmm]}{7279 [mm]} = 12048 [kg] \quad (100)$$

Luego, a partir de una sumatoria de fuerzas, se puede determinar la reacción en el perno:

$$R_t + R_p - \Sigma Cargas = 0 \quad (101)$$

$$R_p = \Sigma Cargas - R_t = 4049 [kg] \quad (102)$$

Estos valores también fueron verificados mediante una planilla de cálculo:

Tabla 8

CALCULO DE REACCIONES EN EL TRAILER					
Cálculo de Reacciones en Trailer	Dist. desde perno rey a centro de tandem [mm]	7279	Reacción en el tandem [Sumatoria de Momento / Dist. al perno rey] [Kg]	12048	74,85%
Datos de entrada al Tractor	Dist. Eje delantero a perno trailer [mm]	3400	Reacción en el perno [Tara - reacción en tandem trasero] [Kg]	4049	25,15%
	Dist. Eje delantero al centro del tandem [mm]	3775			
Total Bruto Trailer				16097	100,00%

Nota. Cálculo de reacciones.

Una vez calculadas las reacciones, se procede a determinar si el tráiler cumple con la normativa, verificando que los pesos en los distintos ejes sean inferiores a los límites legales.

Finalmente, la distribución de carga resulta:

Tabla 9

DISTRIBUCION DE CARGA DE LA CONFIGURACIÓN COMPLETA					
	Eje Direccional	Perno Rey (RP)	Tandem del Tractor	Tandem del Trailer (RT)	Total Carga
	[Kgs]	[Kgs]	[Kgs]	[Kgs]	[Kgs]
Tara Tractor	5340		4407		9747
Tara Trailer	402	4049	3647	12048	16097
Combinación	5742		8054	12048	25844
MAX LEGAL	6000		18000	18000	42000

Nota. Distribución de carga de la configuración completa.

Del análisis de cargas por eje se verifica que ninguno de ellos supera los límites legales; asimismo, el peso bruto total combinado del conjunto se mantiene por debajo del máximo permitido. En consecuencia, el tráiler cumple con la normativa vigente y es apto para circular por la red vial argentina.

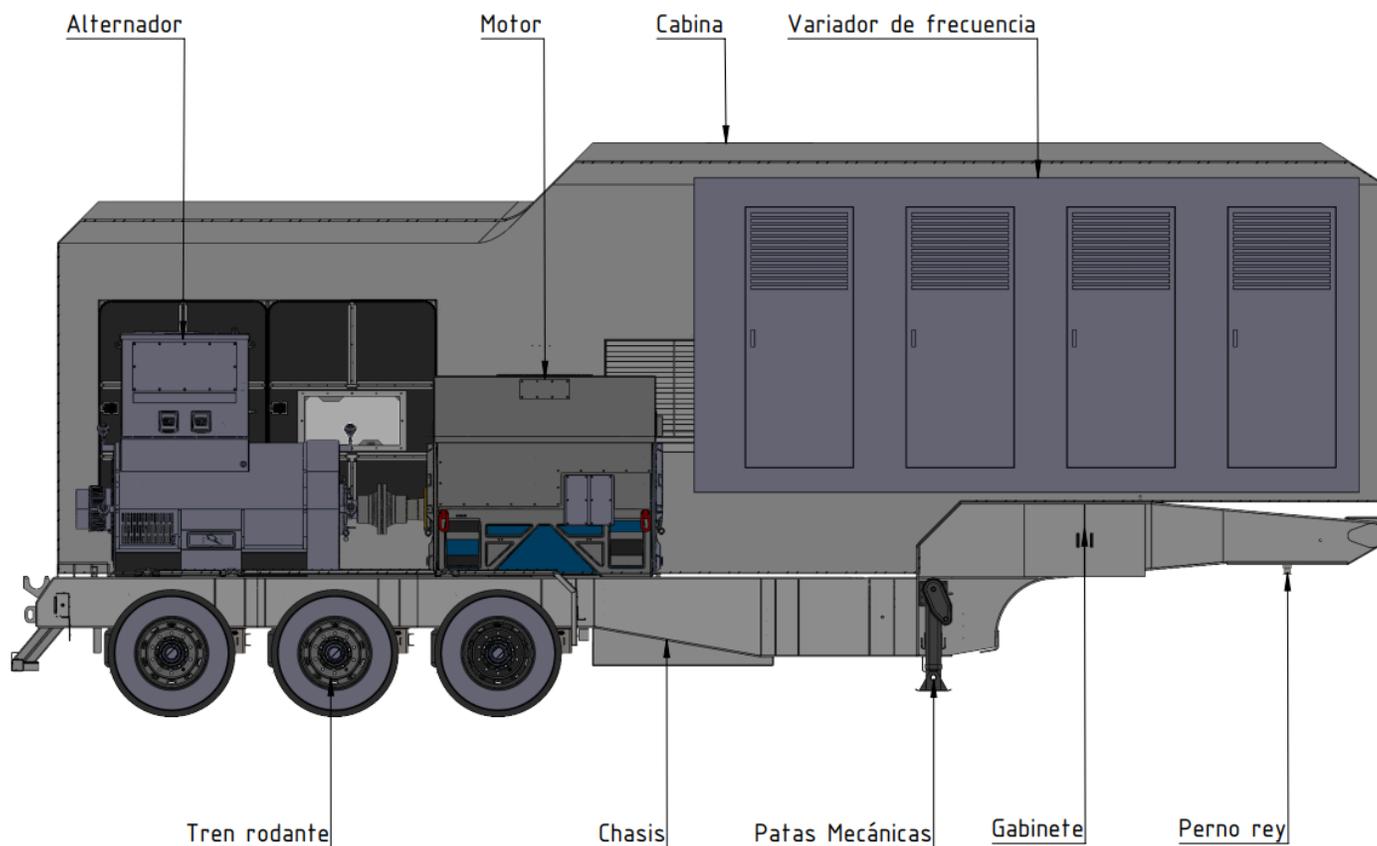
Dado que el conjunto verifica con holgura y con el objeto de optimizar costos, se propone sustituir el tándem del tráiler (los restantes ejes pertenecen al camión). Según la tabla precedente, la carga sobre el eje trasero es de 12048 [kg]. En función de ello, se reemplaza el tándem doble compuesto por dos ejes duales —capacidad máxima 18000 [kg] según Figura 82— por un tándem doble mixto (un eje dual y uno simple), con capacidad máxima de 14000 [kg].

Verificación estructural genset

Para realizar el análisis, se presenta a continuación una vista lateral de la estación generadora que incluye sus principales componentes. Nuevamente cabe aclarar que este esquema constituye una aproximación preliminar al diseño definitivo del equipo y, si bien resulta de utilidad para la evaluación de la distribución de cargas, la disposición de los distintos elementos podría modificarse a lo largo del desarrollo del proyecto en función de diversos factores. Asimismo, no se han representado los circuitos auxiliares, los cables de conexión, los soportes ni otros elementos complementarios.

A diferencia de la estación transformadora, el análisis de la estación generadora se inicia considerando un tren rodante del tráiler conformado por un triple eje con ruedas duales, dado que este equipo incorpora componentes de mayor peso.

Figura 92



Nota. Vista lateral estación generadora.

A continuación se presentan los pesos de los componentes principales incluidos en el análisis. Al igual que en el caso anterior, debido a que estos valores resultan considerablemente mayores en comparación con los asociados a los circuitos auxiliares, los cables de conexión, los soportes, las barandas y otros elementos secundarios, se considera justificado prescindir del efecto de estos últimos en el desarrollo del estudio:

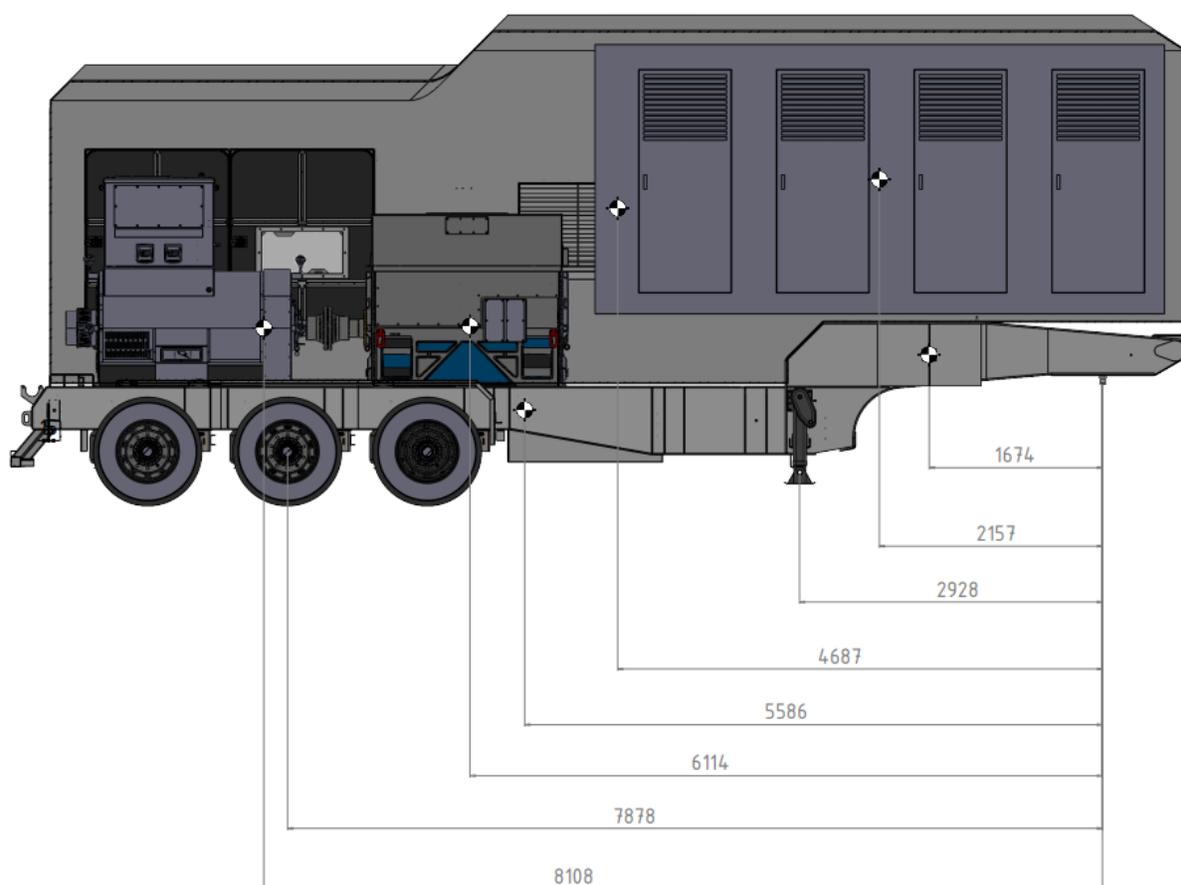
- Sala de alojamiento: 9500 [kg]
- Variador de frecuencia: 12000 [kg]
- Motor: 6121 [kg]
- Alternador: 6700 [kg]

- Chasis: 3700 [kg]
- Tren rodante (tándem 3 ejes): 3000 [kg]
- Patas mecánicas: 120 [kg]
- Gabinete completo: 300 [kg]

Desde este punto, el proceso de cálculo es exactamente igual que antes. En consecuencia, y con el fin de evitar redundancias, en las secciones siguientes se presentan únicamente las imágenes pertinentes y las tablas extraídas de la planilla de cálculo.

Distancia de los componentes al perno rey

Figura 93



Nota. Distancia [mm] de cada componente al perno rey.

Sumatoria de momentos respecto del perno rey

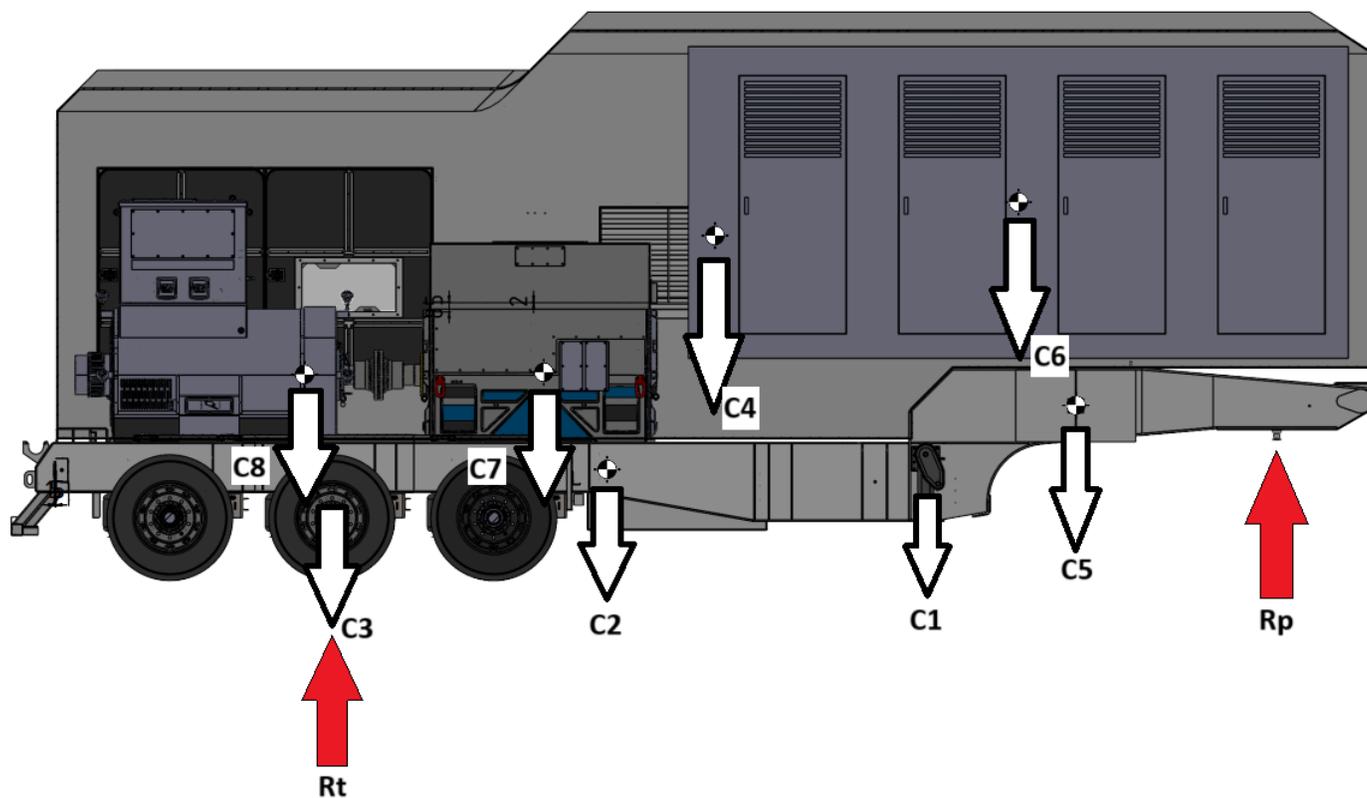
Tabla 10

Cargas	Descripción	Kgs	Distancia al Perno Rey (mm)	Momento (Kgmm)	%
C1	Carga patas mecánicas	120	2928	351360	0,19%
C2	Carga de chasis	3700	5586	20668200	11,21%
C3	Carga de tándem 3 ejes	3000	7878	23634000	12,82%
C4	Carga del cabinado	4600	4687	21560200	11,70%
C5	Carga del gabinete completo	300	1674	502200	0,27%
C6	Carga del variador de frecuencia	12000	2157	25884000	14,04%
C7	Carga del motor	6121	6114	37423794	20,30%
C8	Carga del alternador	6700	8108	54323600	29,47%
Totales	Tara (Kgs)	36541	Σ de Momentos (Kgmm)	184347354	100,00%

Nota. Sumatoria de momentos [kgmm] respecto al perno rey.

Cargas y reacciones

Figura 94



Nota. Cargas y reacciones.

Cálculo de las reacciones

Tabla 11

CALCULO DE REACCIONES EN EL TRAILER					
Cálculo de Reacciones en Trailer	Dist. desde perno rey a centro de tandem [mm]	7878	Reacción en el tandem [Sumatoria de Momento / Dist. al perno rey] [Kg]	23400	64,04%
Datos de entrada al Tractor	Dist. eje delantero a perno trailer [mm]	3400	Reacción en el perno [Tara - reacción en tandem trasero] [Kg]	13141	35,96%
	Dist. Eje delantero al centro del tandem [mm]	3775			
Total Bruto Trailer				36541	100,00%

Nota. Cálculo de reacciones.

Luego, las reacciones en el tándem, de triple eje en este caso, y en el perno resultas:

- $R_t = 23400$ [kg]
- $R_t = 13141$ [kg]

Distribución de carga de la configuración completa

Finalmente, la distribución de carga del conjunto entero se observa en la siguiente tabla:

Tabla 12

DISTRIBUCION DE CARGA DE LA CONFIGURACIÓN COMPLETA					
	Eje Direccional	Perno Rey (RP)	Tandem del Tractor	Tandem del Trailer (RT)	Total Carga
	[Kgs]	[Kgs]	[Kgs]	[Kgs]	[Kgs]
Tara Tractor	5340		4407		9747
Tara Trailer	1305	13141	11835	23400	36541
Combinación	6645		16242	23400	46288
MAX LEGAL	6000		18000	25500	49500

Nota. Distribución de carga de la configuración completa.

Se verifica que tanto el tándem del tráiler como el del tractor se encuentran dentro de los límites legales vigentes; no obstante, el eje direccional supera el máximo normativo (6.645 [kg] > 6.000 [kg]). Sin embargo, el parámetro más restrictivo para los conjuntos de arrastre es el peso bruto total combinado (PBTC), que en este caso resulta conforme (46.288 [kg] < 49.500 [kg]).

Para circular en la red vial argentina, los tractocamiones y sus tráilers deben aprobar la Revisión Técnica Obligatoria (RTO), inspección periódica en talleres habilitados que acredita

condiciones de seguridad y aptitud para el tránsito, conforme a la Ley 24.449 y el Decreto 779/95. La verificación comprende, entre otros ítems, sistemas de freno, dirección y suspensión, neumáticos y llantas, luces y señalización, identificación y elementos de acople; asimismo, se pesa el conjunto para constatar el PBTC. Cumplidos estos requisitos, el vehículo obtiene el certificado correspondiente y queda habilitado para circular.

Si bien la carga sobre el eje direccional excede el límite legal, se mantiene dentro de la capacidad técnica declarada por el fabricante, según la Tabla 6 (6.645 [kg] < 7.500 [kg]). En virtud de que el conjunto verifica el PBTC, se gestiona una autorización especial que deja constancia de esta condición: el eje direccional supera el máximo legal, pero no excede la capacidad técnica del camión. En consecuencia, el tractocamión se considera habilitado para circular por la red vial argentina.

Cálculo de los cortocircuitos

Ubicación geográfica de interés

Para fines de octubre de 2024 Vaca Muerta contaba con 3830 pozos en funcionamiento, según la consultora RICSA. “Al observar la ubicación de los pozos activos de la formación shale hay un grupo de áreas que se destacan con claridad, coincidiendo por esto con los bloques que lideran la producción de Vaca Muerta.

En el segmento de la producción de petróleo la ‘santa trinidad’ de YPF lidera por varios cuerpos de ventaja el sector. El bloque Loma Campana es el que tiene la gran mayoría de los pozos de shale oil activos, con 549. Le sigue otro bloque de los operados por la petrolera de bandera, La Amarga Chica, con 207 pozos en producción, y cierra el trío de YPF Bandurria Sur con otros 99 pozos entregando producción. En este sector el cuarto lugar correspondió en abril al área Bajada del Palo Oeste de Vista, con 94 pozos activos, seguida por Cruz de Lorena de Shell con 51 pozos en esa condición.” (Victoria Terzaghi, 2024).

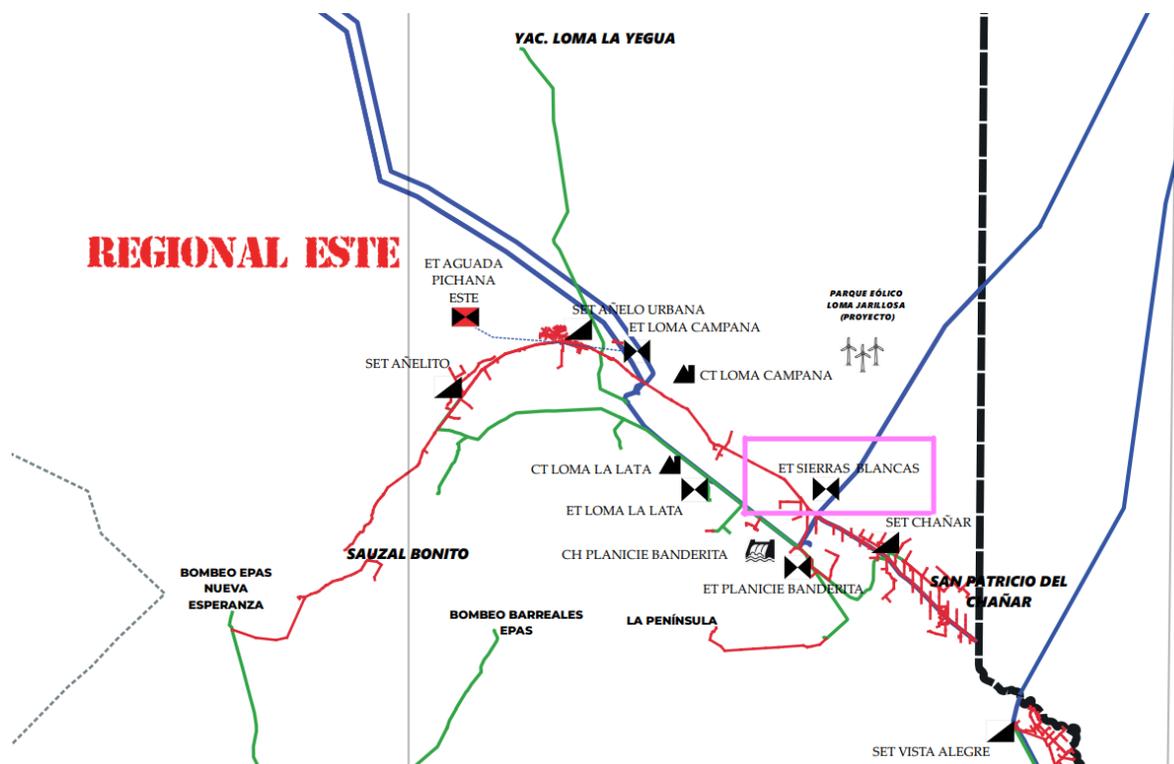
“Vaca Muerta comenzó el 2025 cómo terminó el 2024: superando sus propios récords. Esta vez la formación no convencional logró aumentar la cantidad de pozos conectados y mostró un crecimiento interanual más que interesante. Según el informe de la consultora Economía & Energía, las compañías conectaron 33 pozos en enero esto significa un aumento del 94% con respecto al mismo mes del 2024 y un leve crecimiento (para lo que nos tiene acostumbrado el shale argentino) del 6% con respecto a diciembre de 2024.

En 2025 se proyectan cerca de 500 pozos, un aumento aproximado del 23% con respecto a los 405 pozos que se conectaron el 2024 en la formación no convencional.” (Antonio Ojeda, 2025).

En el presente proyecto se llevará a cabo el análisis de uno de los pozos petroleros ubicados en el bloque Cruz de Lorena. Este área se encuentra en la región de Sierras Blancas, al este de la provincia de Neuquén.

El suministro eléctrico de la zona proviene de la estación transformadora Sierras Blancas (132/33/13,2 [kV]) con una capacidad instalada de 2 x 30 [MVA]. Dicha estación está interconectada al Sistema Argentino de Interconexión (SADI) mediante la sección de la línea de Alta Tensión de 132 [kV] Playa Planicie Banderita-Medanito. La distancia entre la estación transformadora y los distintos pozos petroleros de la región varía entre 10 y 20 kilómetros.

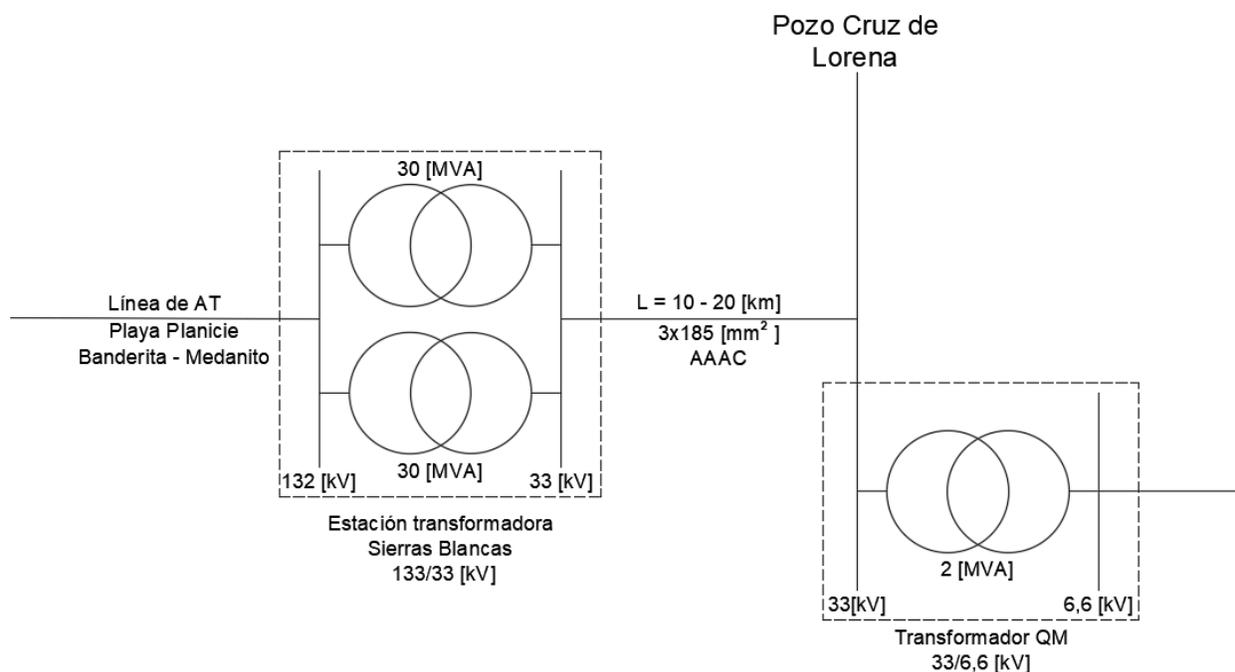
Figura 95



Nota. Mapa EPEN (Ente Provincial de Energía del Neuquén), región este.

Con base en la información proporcionada por una empresa operadora en Vaca Muerta, se establece que el transporte de energía en media tensión se lleva a cabo mediante conductores de aluminio tipo AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor* o conductor de aleación de aluminio), con una sección de 185 [mm²]. De esta forma, se obtiene el siguiente diagrama unifilar:

Figura 96



Nota. Esquema unifilar de la subestación transformadora y la línea que interconecta con el transformador de empleo.

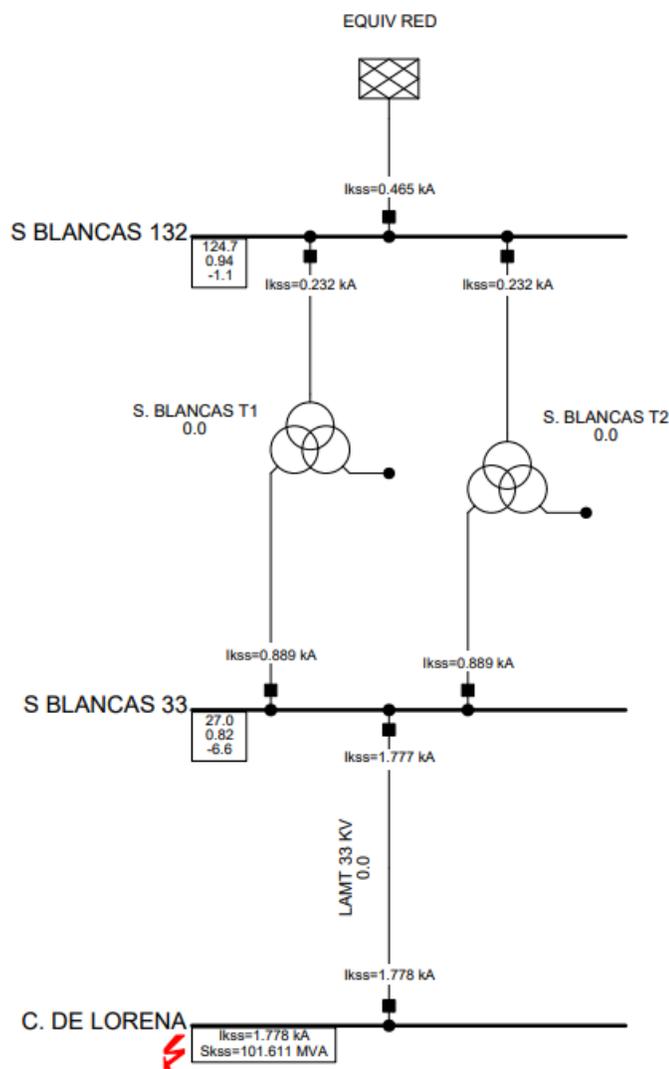
Potencia de cortocircuito de la red

Para llevar a cabo el cálculo de las corrientes de cortocircuito, es fundamental determinar previamente la potencia de cortocircuito de la red. En este caso, se busca conocer la potencia de cortocircuito (S_{cc}) en la barra de conexión del transformador 33/6,6 [kV], considerando una S_{cc} infinita en 132 [kV], además de la contribución de la Estación Transformadora (ET) 132/33/13,2 [kV] y la caída de tensión en la línea de media tensión.

Los cálculos fueron realizados por el Ing. Casamitjana de EDEA utilizando el software DIGSILENT, con base en la información proveniente de la base de datos de CAMESA del

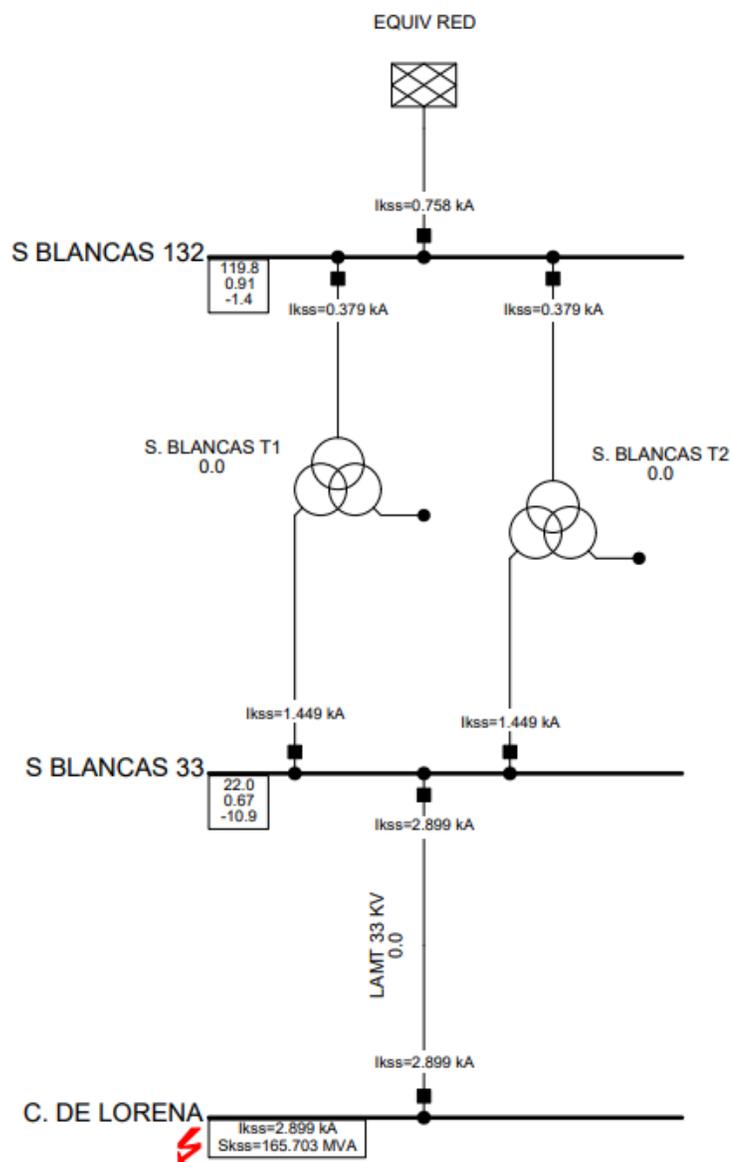
Sistema Argentino de Interconexión (SADI). Como los pozos se encuentran en un radio de 10 a 20 [km] respecto a la ET Sierras Blancas, se realizaron dos cálculos:

Figura 97



Nota. Corto Cruz de Lorena LAMT 33 [kV] - 20 [km].

Figura 98



Nota. Corto Cruz de Lorena LAMT 33 [kV] - 10 [km].

Para realizar los cálculos se considerará el peor caso, es decir que se asumirá que el pozo se encuentra a 10 [km] de distancia de la estación transformadora, ya que la impedancia es menor. Luego, la potencia de cortocircuito de la red resulta:

$$S_{k_{red}} = 165,703 \text{ [MVA]} \quad (103)$$

Se consideró el caso de mayor potencia de cortocircuito que equivale a una impedancia de red menor y, por lo tanto, una mayor corriente de cortocircuito para el dimensionado de las protecciones.

Relación R/X de la red

Para efectuar el cálculo de las impedancias, es necesario establecer previamente la relación R/X de la red. Dicha relación corresponde a la impedancia equivalente de todo el sistema aguas arriba del transformador dimensionado, en este caso de 2 [MVA]. Dado que la determinación precisa de este parámetro implica un procedimiento complejo y dependiente de múltiples factores (configuración de la red, características de los conductores, longitud de los alimentadores, entre otros), se opta por adoptar un valor representativo. Con base en la revisión bibliográfica y antecedentes técnicos, se selecciona como aproximación una relación R/X = 0,3, la cual resulta adecuada para redes de distribución de media tensión.

Cálculo de las impedancias

Para realizar los cálculos de cortocircuito, primero se deben determinar las impedancias de la red de distribución, el cable, el transformador y el motor:

Red

Se calcula la impedancia en media tensión:

$$Z_r = 1,1 * \frac{U_n^2 \text{ [kV]}^2}{S_k \text{ [MVA]}} \quad (104)$$

$$Z_r = 1,1 * \frac{33^2 [kV]^2}{165,7 [MVA]} = 7,23 [\Omega] \quad (105)$$

Luego:

$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + X_r^2} \quad (106)$$

Con:

$$R_r = 0,3 * X_r \quad (107)$$

Resulta:

$$Z_r = \sqrt{(0,3X_r)^2 + X_r^2} \quad (108)$$

$$X_r = \sqrt{\frac{Z_r^2}{1+0,3^2}} = \sqrt{\frac{7,23 [\Omega]}{1+0,3^2}} = 6,92 [\Omega] \quad (109)$$

$$R_r = 0,3 * X_r = 2,08 [\Omega] \quad (110)$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \arctg\left(\frac{6,92 [\Omega]}{2,08 [\Omega]}\right) = 73,3^\circ \quad (111)$$

Por otro lado, la impedancia de la red debe referirse al secundario, dividiendo el valor obtenido por la relación de transformación al cuadrado:

$$Z_{r(BT)} = \frac{7,23 [\Omega]}{\left(\frac{33}{6,6}\right)^2} = 0,289 [\Omega] \quad (112)$$

Transformador

$$Z_T = U_{cc} [^\circ/1] * \frac{U_n^2 [kV]^2}{S_T [MVA]} \quad (113)$$

$$Z_T = 0,06 * \frac{6,6^2 [kV]^2}{2[MVA]} = 1,307 [\Omega] \quad (114)$$

Luego:

$$R_T = U_r [^\circ/1] * \frac{U_n^2 [kV]^2}{S_T [MVA]} \quad (115)$$

Siendo:

$$U_r [^\circ/1] = \frac{P_{cc}}{S_T} = \frac{26,4 [kW]}{2500 [kVA]} = 0,01056 \quad (116)$$

Entonces:

$$R_T = 0,01056 * \frac{6,6^2 [kV]^2}{2 [MVA]} = 0,23 [\Omega] \quad (117)$$

Por último utilizando y despejando la ecuación tal:

$$X_T = \sqrt{1,307^2 - 0,23^2} = 1,29 [\Omega] \quad (118)$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \arctg\left(\frac{1,29 [\Omega]}{0,23 [\Omega]}\right) = 79,9^\circ \quad (119)$$

Por otro lado, la reactancia homopolar del transformador se estimó como un 0,9 de la impedancia directa, mientras la resistencia homopolar resulta equivalente a la directa:

$$R_{T0} = R_T = 0,23 [\Omega] \quad (120)$$

$$X_{T0} = 0,9 * X_T = 1,161 [\Omega] \quad (121)$$

$$Z_{T0} = \sqrt{R_{T0}^2 + X_{T0}^2} = 1,18 [\Omega] \quad (122)$$

$$\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} * \arctg\left(\frac{1,161 [\Omega]}{0,207 [\Omega]}\right) = 79,9^\circ \quad (123)$$

Motor

Para el cálculo de la impedancia del motor se utiliza la corriente de arranque y la tensión nominal del mismo:

$$Z_M = \frac{U_n [kV]}{\sqrt{3} * I_{arr} [kA]} \quad (124)$$

$$Z_M = \frac{6,6 [kV]}{\sqrt{3} * 1,68 [kA]} = 2,26 [\Omega] \quad (125)$$

En la práctica, los manuales y normas recomiendan adoptar un valor estándar de $R/X=0,3$ reflejando que cuando hay un cortocircuito la resistencia del motor es de un 30% de la reactancia.

$$Z_M^2 = X_M^2 + R_M^2 \rightarrow Z_M^2 = X_M^2 + (0,3 X_M [\Omega])^2 \quad (126)$$

$$X_M = \sqrt{\frac{Z_M^2}{1^2 + 0,3^2}} = \sqrt{\frac{(2,26 [\Omega])^2}{1^2 + 0,3^2}} = 2,16 [\Omega] \quad (127)$$

$$R_M = 0,3 * 2,16 [\Omega] = 0,65 [\Omega] \quad (128)$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \operatorname{arctg}\left(\frac{2,16 [\Omega]}{0,65 [\Omega]}\right) = 73,3^\circ \quad (129)$$

Cable

A partir de la Figura 57 presentada en la sección de verificación por caída de tensión, se determinaron la resistencia y la inductancia de la línea. Posteriormente, se calculó el módulo y el ángulo de la impedancia a la temperatura de régimen, correspondiente a 90 [°C].

$$R = 0,161 [\Omega/km] \cdot 0,3 [km] = 0,0483 [\Omega] \quad (130)$$

$$X = 0,095 [\Omega/km] \cdot 0,3 [km] = 0,0285 [\Omega] \quad (131)$$

$$|Z_L| = \sqrt{R_L^2 [\Omega] + X_L^2 [\Omega]} \quad (132)$$

$$|Z_L| = \sqrt{(0,0483 [\Omega])^2 + (0,0285 [\Omega])^2} = 0,056 [\Omega] \quad (133)$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \operatorname{arctg}\left(\frac{X_L [\Omega]}{R_L [\Omega]}\right) \quad (134)$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \operatorname{arctg}\left(\frac{0,0285 [\Omega]}{0,0483 [\Omega]}\right) = 30,5^\circ \quad (135)$$

También se calcularon las impedancias de los cables para una temperatura de 20 [°C] para su posterior uso en cálculo de cortocircuito máximo mediante la siguiente ecuación:

$$R = R_0 * (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (136)$$

Con un coeficiente de temperatura del aluminio medido a 20 [°C] de:

$$\alpha = 0,00403 [K^{-1}] \quad (137)$$

Por lo tanto, para obtener las resistencias a 20 [°C] se despejo $R_{20^{\circ}C}$ resultando:

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{R}{(1 + \alpha * \Delta T)} \quad (138)$$

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{0,0483 [\Omega]}{(1 + 0,00403 [K^{-1}] * 70^{\circ}K)} = 0,038 [\Omega] \quad (139)$$

Resultando una impedancia de:

$$|Z_{20^{\circ}C}| = \sqrt{(0,038 [\Omega])^2 + (0,0285 [\Omega])^2} = 0,047 [\Omega]$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \arctg\left(\frac{0,0285 [\Omega]}{0,038 [\Omega]}\right) = 36,8^\circ \quad (140)$$

Por otro lado, se determinó la impedancia homopolar en el cable. En primer lugar, se determina la resistencia homopolar mediante la siguiente ecuación:

$$R_0 = R_1 + 3 * R_N \quad (141)$$

Al ser un cable tripolar debemos obtener la resistencia de la pantalla electrostática constituidas por alambres de cobre y/o cintas de cobre. “Esta pantalla constituye una protección eléctrica contra contactos involuntarios y en caso de averías mecánicas graves, debe prevenir las peligrosas tensiones de contacto, como así también la circulación de la corriente capacitiva

del cable en servicio normal y de la corriente de cortocircuito en caso de falla.”(CIMET OPTEL, 2023,p.61).

Por lo tanto, del catálogo se extrajo el dato de que, para cables tripolares, dicha pantalla tiene una sección de $12 [mm^2]$. Para calcular la resistencia de la pantalla se utilizó la siguiente expresión:

$$R_{pantalla} = \rho * \frac{L}{S} \quad (142)$$

Luego, sabiendo la resistividad eléctrica del cobre a $20 [^{\circ}C]$ y la longitud del cable, se obtiene la resistencia de la pantalla a $20 [^{\circ}C]$:

$$R_{pantalla} = 0,01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right] * \frac{300 [m]}{12 [mm^2]} = 0,431 [\Omega] \quad (143)$$

Como más adelante es de interés el cortocircuito monofásico mínimo, se calcula la resistencia de la pantalla a temperatura de régimen, es decir $90 [^{\circ}C]$.

$$R_{90^{\circ}C} = 0,431 [\Omega] * (1 + 0,00393 [K^{-1}] * 70^{\circ}K) = 0,55 [\Omega] \quad (144)$$

Una vez calculado el valor de resistencia de la pantalla a $90 [^{\circ}C]$ se procede a obtener la resistencia homopolar:

$$R_0 = 0,0483 [\Omega] + 3 * 0,55 [\Omega] = 1,7 [\Omega] \quad (145)$$

Lo siguiente fue determinar la inductancia homopolar a partir de ecuación:

$$X_0 = 3,7 * X_1 \quad (146)$$

$$X_0 = 3,7 * 0,0285 [\Omega] = 0,10545 [\Omega] \quad (147)$$

Por último:

$$|Z_0| = \sqrt{(1,7 [\Omega])^2 + (0,10545 [\Omega])^2} = 1,7 [\Omega] \quad (148)$$

$$\varphi = \frac{180[^\circ]}{\pi} * \arctg\left(\frac{0,10545 [\Omega]}{1,7 [\Omega]}\right) = 3,5^\circ \quad (149)$$

Se realizó una tabla a modo de resumir los módulos y fases de las impedancias calculadas anteriormente.

Tabla 13

Equipo	$ Z [\Omega]$	$\varphi [^\circ]$
Red (referida al secundario)	0,289	73,3
Transformador (referida al secundario)	1,307	79,9
Motor	2,26	73,3
Cable (Temperatura de régimen)	0,056	30,5
Cable (Temperatura a 20°C)	0,047	36,8
Homopolar del transformador (referida al secundario)	1,18	79,9
Homopolar del cable	1,7	3,5

Nota: Resumen de módulos y fases de cada una de las impedancias.

Corrientes de cortocircuito

Para el dimensionamiento de los dispositivos de protección es necesario realizar dos cálculos de cortocircuito:

1. La corriente de cortocircuito trifásica máxima,

2. La corriente de cortocircuito monofásica mínima.

La corriente de cortocircuito máxima se utiliza para dimensionar la capacidad de ruptura o interrupción de los dispositivos de protección, así como la resistencia mecánica y térmica de los conductores y equipos ante el esfuerzo electrodinámico que genera un cortocircuito.

La corriente de cortocircuito mínima se utiliza para asegurar que las protecciones actúen de manera fiable y en el tiempo estipulado, garantizando que incluso el cortocircuito más leve y menos energético sea detectado y despejado eficientemente.

Cortocircuito trifásico máximo

El cálculo de la corriente de cortocircuito trifásico fue realizado en los bornes del transformador, específicamente en el lado secundario, con el objetivo de determinar la sollicitación eléctrica más exigente que deberá soportar el interruptor automático.

La corriente de cortocircuito trifásica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_{k3}'' = c * \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_1} \quad (150)$$

Donde “c” corresponde al factor de tensión, el cual es función del nivel de tensión de la red y según si se quiere obtener el valor máximo o mínimo.

Tabla 14

Tensión nominal [kV]	C_{max}	C_{min}
0,1-1	1,1	0,95
1-35	1,1	1
>35	1,1	1

Nota: Factor de tensión "c".

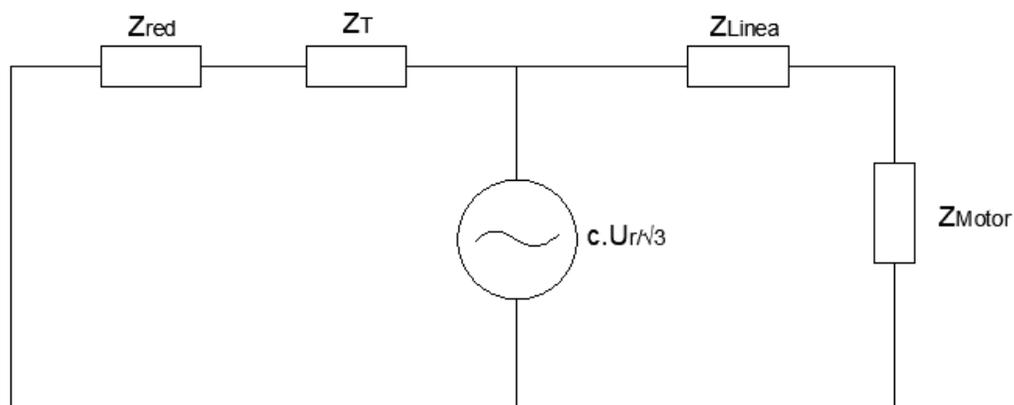
El cortocircuito al ser en bornes del lado secundario del transformador, es decir, con una tensión de 6,6 [kV] y queriendo calcular la corriente máxima, el factor "c" equivale a 1,1.

Luego, Z_1 , la impedancia directa equivalente.

Como la impedancia se encuentra en el denominador, la corriente será mayor cuanto menor sea la impedancia. Por este motivo, se utiliza la impedancia del cable a 20 [°C], ya que es menor que a temperatura de régimen (90[°C]).

Por lo tanto, el circuito equivalente resulta:

Figura 99



Nota: Circuito equivalente para cálculo del cortocircuito trifásico.

$$\diamond Z_{eq} = (Z_M + Z_L) // (Z_r + Z_T)$$

$$Z_{eq_1} = (2,26 \angle 73,3^\circ) + (0,047 \angle 36,8^\circ) \quad (151)$$

$$Z_{eq_1} = (2,3 \angle 72,6^\circ) \quad (152)$$

$$Z_{eq_2} = (0,289 \angle 73,3^\circ) + (1,307 \angle 79,9^\circ) \quad (153)$$

$$Z_{eq_2} = (1,6 \angle 78,7^\circ) \quad (154)$$

$$Z_{eq} = (2,3 \angle 72,6^\circ) // (1,6 \angle 78,7^\circ) \quad (155)$$

$$Z_{eq} = (0,94 \angle 76,2^\circ) \quad (156)$$

Una vez obtenido la impedancia equivalente, se calcula la corriente de cortocircuito trifásica máxima:

$$I_{k3}''_{max} = 1,1 \frac{(6600 \angle 0^\circ) [V]}{\sqrt{3} * [(0,94 \angle 76,2^\circ)] [\Omega]} = (4,46 \angle -76,2^\circ) [kA] \quad (157)$$

$I_{k3}''_{max} = 4,46 [kA]$

Cortocircuito monofásico mínimo

Se procederá al cálculo del cortocircuito monofásico mínimo en el extremo del cable, es decir, a la llegada del *genset*. Este estudio permite determinar la corriente de falla más baja que podría presentarse bajo condiciones de cortocircuito monofásico.

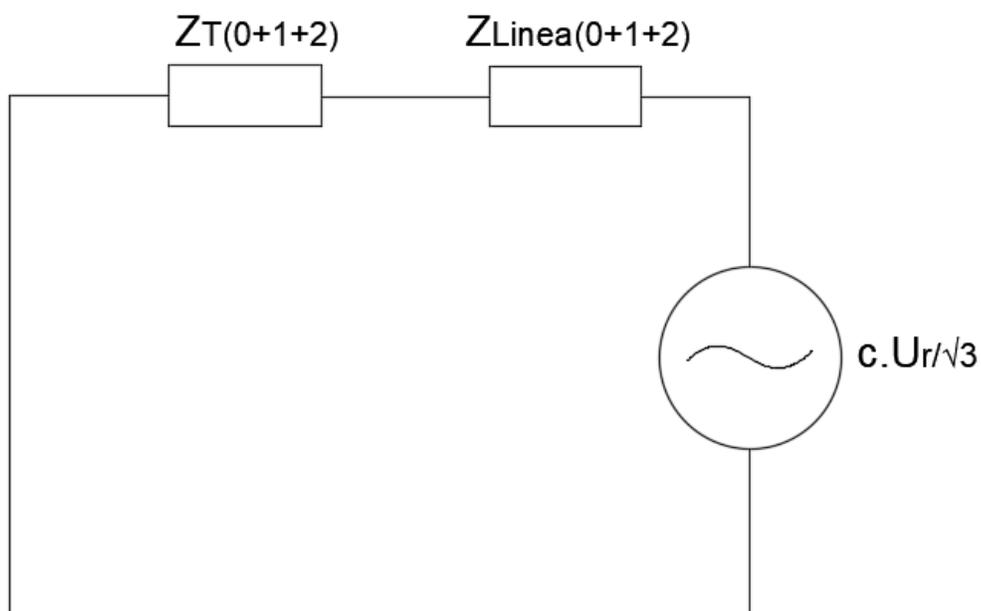
La corriente de cortocircuito monofásica se determina como:

$$I_{k1}'' = c \frac{\sqrt{3} U_n}{|Z_0 + Z_1 + Z_2|} \quad (158)$$

Dado que se trata de un cortocircuito mínimo, el factor de tensión adoptado es igual a la unidad.

Como se comentó anteriormente, un aumento en la impedancia implica una reducción de dicha corriente. Por esta razón, para el cálculo del cortocircuito mínimo se considera la impedancia del cable a 90 [°C], ya que es superior a la que presenta a 20 [°C]. El circuito equivalente se presenta a continuación. Tal como se mencionó anteriormente, el cálculo del cortocircuito debe realizarse aguas abajo del cable; por este motivo, el modelo se representa mediante un circuito en serie compuesto por las impedancias del transformador, del cable y la fuente de tensión:

Figura 100



Nota: Circuito equivalente monofásico.

$$Z_{L(0+1+2)} = 2 * (0,056 < 30,56^\circ) + (1,7 < 3,5^\circ) \quad (159)$$

$$Z_{L(0+1+2)} = (1,8 < 5,12^\circ) \quad (160)$$

$$Z_{T(0+1+2)} = 2 * (1,307 < 79,9^\circ) + (1,18 < 79,9^\circ) \quad (161)$$

$$Z_{T(0+1+2)} = (3,79 \angle 79,9^\circ) \quad (162)$$

$$\diamond Z_{eq} = Z_{L(0+1+2)} + Z_{T(0+1+2)} \quad (163)$$

$$Z_{eq} = (1,8 \angle 5,12^\circ) + (3,79 \angle 79,9^\circ)$$

$$Z_{eq} = (4,6 \angle 57,73^\circ) \quad (164)$$

$$I_{k1 min}'' = 1 * \frac{\sqrt{3} \cdot (6600 \angle 0) [V]}{(4,6 \angle 57,73^\circ) [\Omega]} = (2485,1 \angle -57,73^\circ) [A] \quad (165)$$

$I_{k1 min}'' = 2,48 [kA]$

Aparataje

Protecciones de los equipos

Considerando que la celda de protección de la marca Ormazabal cumple la función de resguardar al transformador contra cortocircuitos, se propone la incorporación de un interruptor automático (disyuntor), instalado aguas abajo del mismo. Este dispositivo tiene como finalidad proporcionar una protección adecuada frente a condiciones de sobrecarga y cortocircuito, tanto para el cableado como para el variador de frecuencia y el motor asociado. Asimismo, contribuye a la protección del propio transformador frente a sobrecargas.

“Para la protección del transformador deben tenerse en cuenta algunos parámetros referidos a las corrientes de cortocircuito, dependiendo de las diferentes normas.

La capacidad de sobrecarga admisible por un transformador de distribución está indicada por la norma VDE 0532 en función del tiempo y con la carga previa como parámetro según la siguiente tabla:

Figura 101

Carga permanente previa (%)	Sobrecarga admisible en % de la carga nominal Durante el tiempo que se indica				
	10%	20%	30%	40%	50%
50	3 h	1 h 30'	1 h	30'	15'
75	2 h	1h	30'	15'	8'
90	1 h	30'	15'	8'	4'

Nota: Curvas VDE para sobrecarga admisible del transformador.

Para la protección del transformador las normas ANSI establecen la capacidad de la máquina para soportar corrientes desde tres veces la nominal hasta un cortocircuito en bornes como se indica en la siguiente tabla:

Figura 102

Corriente (I/In)	3	4.75	6.70	11.30	25
Tiempo (seg)	300	60	30	10	2

Nota: Curvas ANSI para cortocircuito en bornes del transformador.

Por otro lado, la elección de la protección primaria de un transformador además de procurar la protección térmica del mismo debe considerar que al energizar un transformador, aun en vacío, se produce un transitorio de corriente cuya magnitud y duración dependen fundamentalmente del valor instantáneo de la tensión en el momento de la conexión, del estado y signo de la magnetización previa y de la relación R/X de la red de alimentación y del propio transformador.

El efecto térmico de esta corriente transitoria puede ser suficiente para fundir el fusible primario si su calibre es demasiado chico. La siguiente tabla expresa en múltiplos de la corriente nominal del transformador los límites inferiores que no deberá cruzar la característica de actuación del fusible para garantizar su no operación al conectar:

Figura 103

Corriente transitoria de conexión				
Corriente térmicamente. equiv (I/In)	3	6	12	35
Tiempo (seg)	10	1	0.1	0.01

Nota: Curva de corriente transitoria de conexión.

Por último, el punto de Saborsky expresa el fenómeno de sobrecorriente por saturación del núcleo de hierro al verse sometido el transformador a una sobretensión de origen atmosférico. El efecto térmico de esta sobrecorriente puede representarse por un valor eficaz de corriente circulando durante 0.02 seg. calculada según la siguiente expresión:

$$I_{0,02} = 7 * \frac{NBA}{U_n} * I_n \quad (166)$$

El Nivel Básico de Aislación (NBA) de transformadores de construcción normal de Tensión nominal 13,2 [kV] es de 95 [kV], dando como resultado una $I_{0,02} = 50 * I_n$. Las normas Americanas fijan este punto para sistemas de 15 [kV] en aproximadamente 80 In.”(Ferreyra,s.f.).

“El nivel de aislamiento representa la capacidad del transformador para soportar tensiones anormales de alta tensión, causadas por rayos, sobretensiones de conmutación o fallos del sistema. Se verifica mediante pruebas dieléctricas específicas:

- Prueba de resistencia a frecuencia industrial (sobretensión de 50/60 Hz durante 1 min).
- Prueba de impulso de tipo rayo (BIL – Nivel básico de aislamiento).
- Prueba de impulso de conmutación (para aplicaciones EHV/UHV).”

Figura 104

Nominal Voltage Class	Typical Power Frequency Test (kV)	Typical BIL (kV)	Application
11 kV	28 kV	95 kV	Distribution
33 kV	70 kV	170 kV	Substations
132 kV	275 kV	550 kV	Transmission
400 kV	630 kV	1425 kV	EHV grids
765 kV	1550 kV	2400 kV	UHV grids

Nota: Nivel básico de aislación (BIL) en función de la tensión nominal.

(Taishan Transformer, 2025).

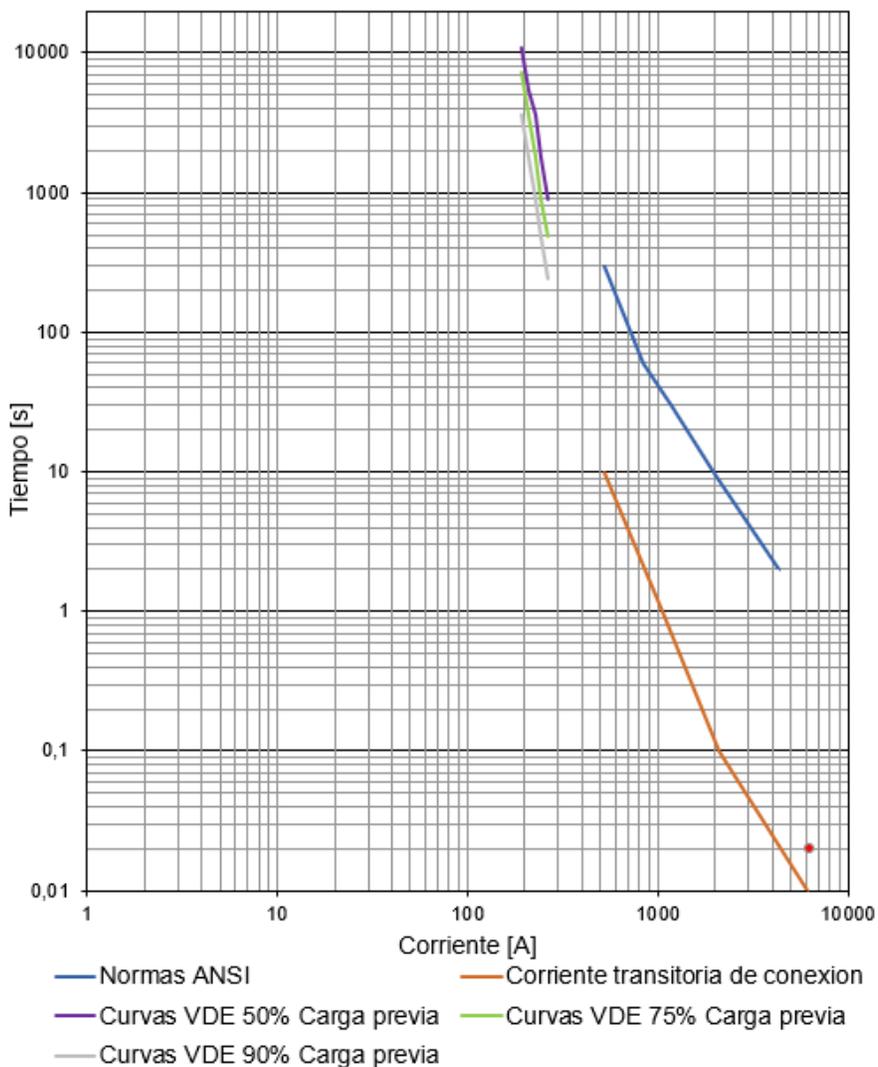
Por lo tanto, el punto de Saborsky resulta:

$$I_{0,02} = 7 * \frac{170 [kV]}{33 [kV]} * 175 [A] = 6310 [A] \quad (167)$$

A continuación, se trazaron las curvas de capacidad para soportar corrientes (Curvas VDE 0532), curvas de cortocircuito en bornes del transformador (Normas ANSI), curva de corriente transitoria de conexión y el punto de Saborsky en la siguiente gráfica:

Figura 105

Curvas del transformador de 2 [MVA]



Nota: Curvas del transformador de 2 [MVA].

Una vez obtenidas las curvas características del transformador, se procede a la selección de los dispositivos de protección: el fusible del lado primario y el interruptor ubicado aguas abajo. Según la Figura 64, para una tensión nominal de 35/36 [kV] y una potencia del transformador de 2000 [kVA], la corriente asignada del fusible resulta ser de 63 [A]. No obstante, tras realizar diversas iteraciones, se decidió incrementar el calibre del fusible a 100

[A], ya que su curva de actuación permite una coordinación completa con la del interruptor automático. Asimismo, la curva característica del fusible seleccionado se encuentra por encima del punto de Saborsky, lo que evita su fusión ante eventuales sobretensiones atmosféricas.

En consecuencia, se selecciona un fusible HH de media tensión (marca Reproel), correspondiente al modelo FH58360100, apto para la tensión indicada.

Figura 106

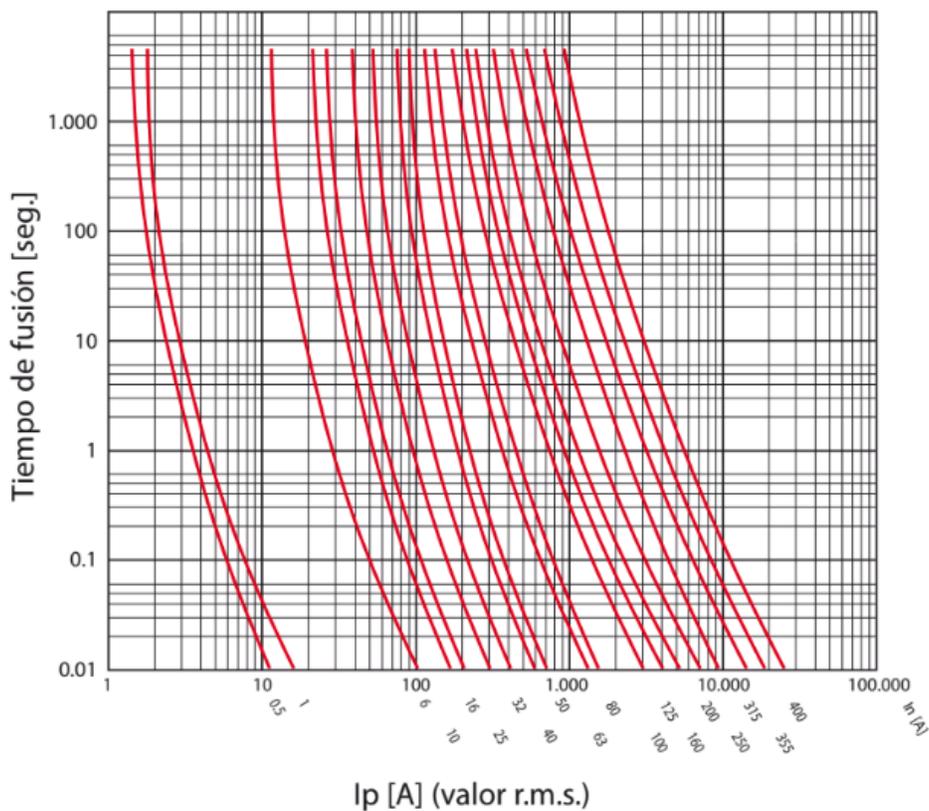
33 / 36 kV				
L-537				
Amp.	Código	Resistencia en frío rohms	Potencia de disipación al	
			100% (W)	50% (W)
0,5	FH55360005	3420	1,3	0,4
1	FH55360001	1710	2,6	0,7
2	FH55360002	850	5,2	1,4
4	FH55360004	430	10,4	2,7
6	FH55360006	280	15,6	3,5
10	FH55360010	172	26	6,5
16	FH55360016	220	57	14,5
20	FH55360020	86	52,5	12,6
25	FH55360025	68	65	16,2
32	FH55360032	54	82,7	20,9
40	FH55360040	43	105	25,2
40	FH57360040	43	105	25,2
50	FH57360050	34	130	32,5
63	FH57360063	27	165	43
80	FH57360080	22	210	52,3
100	FH58360100	17	260	65

Nota: Fusibles HH de media tensión marca Reproel.

Las curvas características (corriente - tiempo de operación) aplicables a transformadores de 13,2 [kV] y 36 [kV] se adjuntan a continuación:

Figura 107

Corriente / tiempo de operación Transformador de Distribución

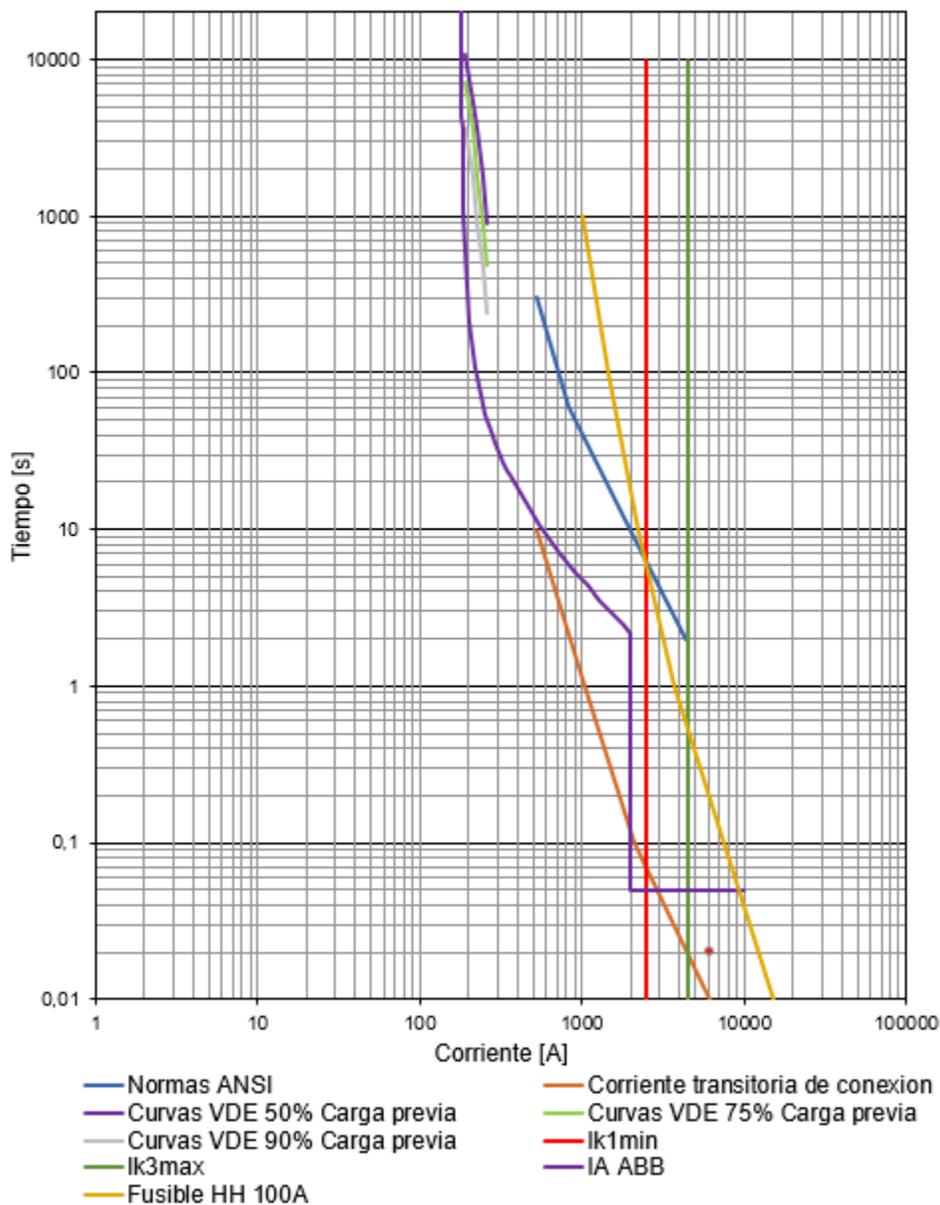


Nota: Curvas características para transformadores de tensión 13,2 y 36 [kV].

Se grafica la curva del fusible FH58360100 junto con las curvas características del transformador:

Figura 108

Curvas del transformador de 2 [MVA]



Nota: Curva del fusible FH58360100.

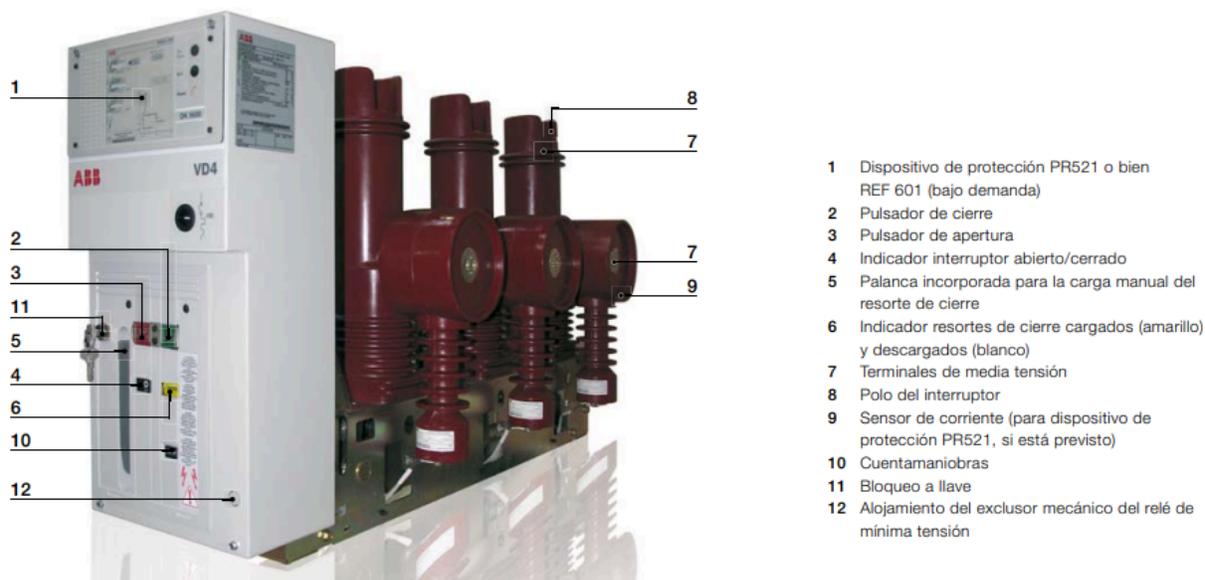
Se aprecia que la curva del fusible (en amarillo) se encuentra por encima de la curva de la corriente transitoria de conexión del transformador y por debajo del punto de Saborsky, lo

cual es necesario para evitar que actúe cuando se produce la conexión del transformador y para protegerlo contra una eventual descarga atmosférica.

En cuanto a los interruptores automáticos de media tensión, estos no poseen curvas termomagnéticas propias como los de baja tensión; la función de protección se obtiene a través de relés de sobrecorriente (relés integrados o externos) que se combinan con el interruptor.

El manual del relé ABB REF601/REJ601, diseñado para interruptores de media tensión en vacío como el VD4-R, indica que la etapa de sobrecorriente utiliza curvas IDMT (*Inverse Definite Minimum Time*). El relé ofrece funciones de protección contra sobrecorriente de tres etapas y falla a tierra de dos etapas.

Figura 109



Nota: Interruptor de MT modelo VD4 de la marca ABB.

Entonces, en primer lugar, se selecciona el interruptor ABB no comercializa un interruptor automático de vacío específicamente de 6,6 [kV]. Su familia VD4 está concebida para tensiones de 12, 17,5 y 24 [kV]. En consecuencia, para proteger al transformador de 6,6 [kV] se utilizará normalmente un interruptor de clase 12 [kV]. El uso de un equipo con

tensión asignada mayor que la tensión de servicio es permitido y habitual: la coordinación dieléctrica y los niveles de aislamiento de un interruptor de 12 [kV] superan ampliamente los requisitos de un sistema de 6,6 [kV], garantizando la seguridad y el cumplimiento normativo. A continuación, se adjuntan las características eléctricas del interruptor VD4-12:

Figura 110

Interruptor	VD4/R 12			
Normas	IEC 62271-100	•		
	CEI EN 62271-100 (fascículo 7642)	•		
Tensión asignada	Ur [kV]	12		
Tensión asignada de aislamiento	Us [kV]	12		
Tensión de ensayo a 50 Hz	Ud (1 min) [kV]	28		
Tensión soportada a impulso	Up [kV]	75		
Frecuencia asignada	fr [Hz]	50-60		
Corriente térmica asignada (40 °C)	Ir [A]	630	800	1250
Poder de corte asignado (corriente asignada simétrica de cortocircuito)	Isc [kA]	12,5	–	–
		16	16	16
		20	20	20
		25	25	25
		25	25	25
Corriente asignada admisible de corta duración (3 s)	Ik [kA]	12,5	–	–
		16	16	16
		20	20	20
		25	25	25
		25	25	25
Poder de cierre	Ip [kA]	31,5	–	–
		40	40	40
		50	50	50
		63	63	63
		63	63	63

Nota: Características eléctricas del interruptor de VD4-12.

Volviendo a la configuración del relé, “la etapa de ajuste bajo de la protección contra sobrecorriente y falla a tierra cuenta con características estándar de Tiempo Mínimo Definido Inverso (IDMT): Normal Inversa (NI - *Normal Inverse*), Extremadamente Inversa (EI - *Extreme Inverse*), Larga Inversa (LI - *Long Inverse*) y Muy Inversa (VI - *Very Inverse*), junto con características de tiempo definido (DT - *Defined Time*) para una mejor coordinación con el resto de la red. Además, se proporciona una curva característica especial RI. Las etapas alta e

instantánea de la protección de sobrecorriente, así como la etapa alta de la protección de falla a tierra, se suministran con características DT.

Cuando se selecciona una característica IDMT, el tiempo de actuación de la etapa pasa a ser función de la corriente: a mayor corriente, menor tiempo de operación. La etapa incorpora diez familias de curvas tiempo/corriente: cuatro según las normas BS 142 e IEC 60255 (normal inversa, muy inversa, extremadamente inversa e inversa de larga duración); cuatro según la norma ANSI C37.xxx (moderada inversa, normal inversa, muy inversa y extremadamente inversa); una curva especial denominada RI, y además la característica de tiempo definido (DT).

La relación entre corriente y tiempo para las curvas estándar normal inversa, muy inversa, extremadamente inversa y larga inversa cumple con las normas BS 142:1966 e IEC 60255-3 y puede expresarse del siguiente modo:

$$t = \frac{(K*\beta)}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} \quad (168)$$

Donde:

- t : tiempo de actuación en segundos
- K : multiplicador de tiempo
- I : valor de corriente medido
- I_{set} : corriente de partida (*pickup*)

La pendiente de las características tiempo/corriente estará determinada por las constantes α y β , según se indica a continuación:"

Figura 111

Slope of the time/current curve set	α	B
Normal inverse	0.02	0.14
Very inverse	1.0	13.5
Extremely inverse	2.0	80
Long time inverse	1.0	120

Nota: Valores de las constantes α y β .

(ABB, 2014, p.37).

A partir de sucesivas iteraciones en la planilla de cálculo, se concluyó que la característica de sobrecorriente muy inversa es la que ofrece el mejor ajuste para la coordinación de protecciones. Finalmente, los parámetros de diseño del relé son:

- $K = 1,6$
- $I_{set} = 181 [A]$ (Apenas por encima de la corriente nominal del transformador)
- $\alpha = 1$
- $\beta = 13,5$

En cuanto al disparo instantáneo, los manuales de los relés ABB el manual especifican que el ajuste de *pick-up* de la función instantánea puede fijarse entre 0,5 y 20 veces el valor de la función de sobrecorriente temporizada (51P), como se muestra en la siguiente figura:

Figura 112

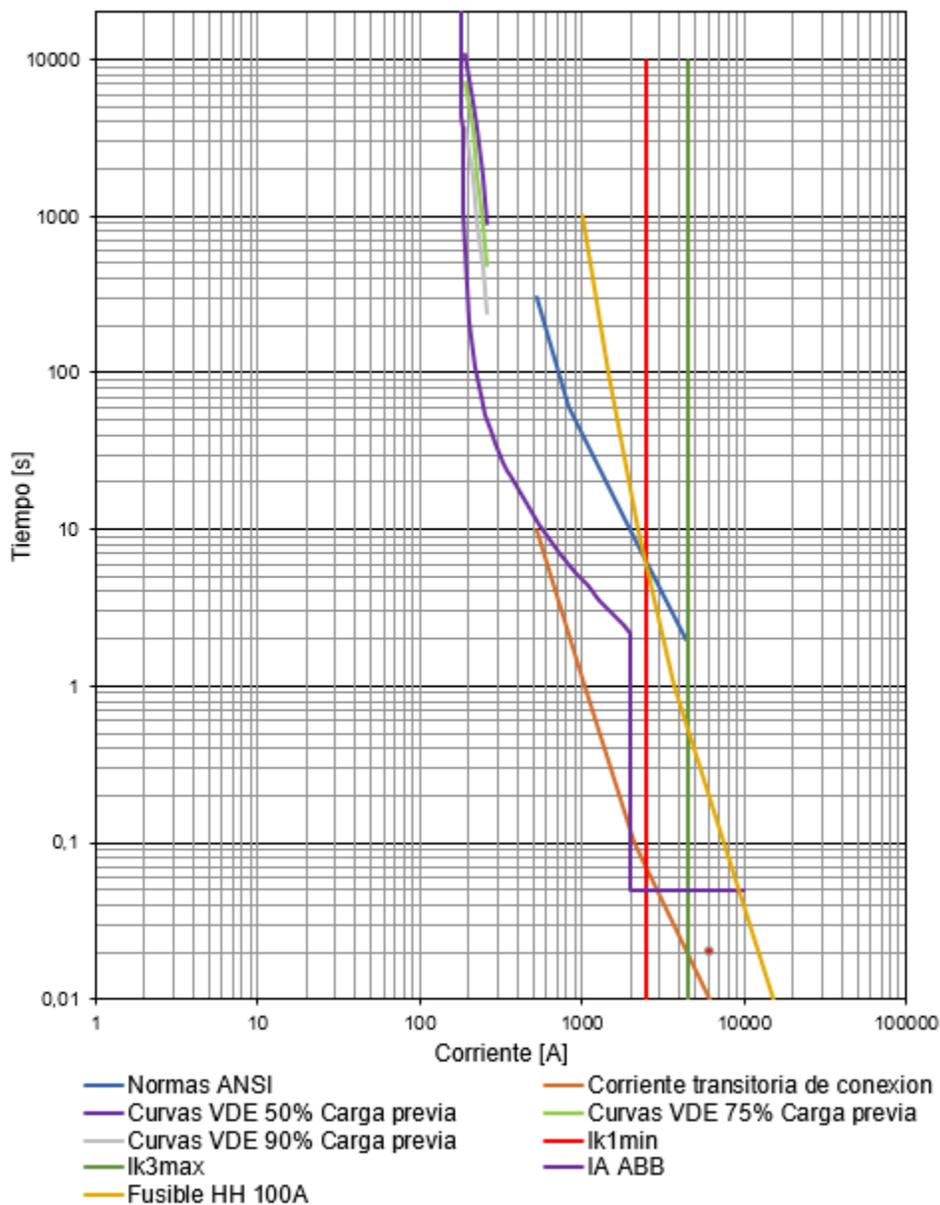
50P-1 Parameter	Range/Curve	Time Dial	Increment
Pickup	0.5 to 20 x 51P setting	- - -	0.1x
Instantaneous Curves			
	Standard	No Delay	- - -
	Inverse Instantaneous	1 to 10	0.1
	Short Time Inverse	1 to 10	0.1
	Short Time Ext. Inverse	1 to 10	0.1
	Definite Time	0 to 9.99	0.01

Nota: Ajuste del disparo instantáneo del relé.

Luego de varias iteraciones se estableció un ajuste de disparo de 2000 [A], lo que implica una relación $\frac{I_{set}}{I} \approx 11,05$.

Figura 113

Curvas del transformador de 2 [MVA]



Nota: Coordinación de protecciones.

Se observa que la curva del interruptor (en violeta) se sitúa por encima de la corriente de conexión del transformador, evitando disparos intempestivos. Esta elección de ajuste implica que la etapa magnética no actuará ante el cortocircuito monofásico mínimo, cuyo valor es del

orden de 2,5 veces la corriente nominal del transformador; en consecuencia, la discriminación frente a dicha falla queda a cargo de la etapa térmica/IDMT, actuando aproximadamente en 10 segundos. Esta estrategia es admisible siempre que el par (I,t) de operación permanezca dentro de la capacidad térmica admisible del transformador y del conductor. Como se demostró previamente, el transformador puede soportar grandes sobrecargas por aproximadamente 30 minutos, por lo que no va a estar comprometido.

Ante un cortocircuito aguas abajo del transformador, el encargado de protegerlo es el interruptor automático. Por lo tanto, la corriente de corte último debe ser mayor que la corriente de cortocircuito trifásica máxima:

$$4,46 [kA] \leq 12,5 [kA] \quad (169)$$

Se verifica que el interruptor es capaz de soportar la corriente de cortocircuito máxima.

Luego se verifica la energía que deja pasar la protección hasta que abre ante un cortocircuito: La energía que deja pasar la protección debe ser menor a la energía que puede admitir el cable. Para la verificación, se deben calcular los valores de energía específica generada utilizando tanto la corriente de cortocircuito máxima como la corriente de cortocircuito mínima.

El mayor de estos valores calculados debe ser menor a la energía específica admisible que soporta el cable.

Considerando el empleo de dispositivos de protección que presentan características de limitación de la corriente de cortocircuito, o con tiempos de apertura inferior a 0,1 [s], la protección de los conductores queda asegurada si se cumple la siguiente expresión:

$$k^2 S^2 \geq I^2 t \quad (170)$$

Siendo:

- I^2t : Máxima energía específica pasante aguas abajo del dispositivo de protección. Este dato no es calculable por el proyectista o instalador, por ser un valor garantizado por el fabricante.
- S : La sección nominal de los conductores, en milímetros cuadrados.
- k : Un factor que toma en cuenta la resistividad, el coeficiente de temperatura y la capacidad térmica volumétrica del conductor, y las temperaturas inicial y final del mismo. Para los conductores aislados con materiales de uso común, los valores de k para los conductores de línea se muestran en la siguiente figura:

Figura 114

Material Conductor	Material Aislante	K
Cu	PVC	114
	XLPE o EPR	142
Al	PVC	74
	XLPE o EPR	93

Nota: Constante K en función del material conductor y el material aislante del cable.

Por lo tanto, la energía específica del cable resulta:

$$K^2 S^2 = \left(93 \left[\frac{A\sqrt{s}}{mm^2}\right] * 240 [mm^2]\right)^2 = 498 [kA^2s] \quad (171)$$

Para determinar la energía específica que el interruptor permite que pase durante cada condición de cortocircuito, es necesario establecer su tiempo de apertura. Dado que las corrientes de falla se encuentran dentro de la zona de operación instantánea de la curva de protección, el tiempo de despeje (o apertura del interruptor) dependerá del valor que se

configure en el ajuste del equipo. En este caso, según se observa en las curvas de coordinación, el tiempo de actuación considerado es de 50 [ms]:

$$t = 0,05 [s] \quad (172)$$

Con este valor, se calcula la energía que deja pasar cada dispositivo de protección. En primer lugar, se determina la energía específica que el sistema permite conducir durante el cortocircuito monofásico:

$$I^2 t_{Protección} = (2485 [A])^2 \cdot 0,05 [s] = 0,308 [kA^2 s] \quad (173)$$

A continuación, se determina la energía específica que el sistema permite conducir durante el cortocircuito trifásico:

$$I^2 t_{Protección} = (4460 [A])^2 \cdot 0,05 [s] = 0,99 [kA^2 s] \quad (174)$$

Se ha determinado que los valores calculados de la energía específica para los escenarios de cortocircuito son significativamente inferiores a la energía específica admisible del cable. Por consiguiente, se verifica satisfactoriamente ante las sollicitaciones de cortocircuito.

Luego, debe verificarse que la línea cumpla con las dos inecuaciones impuestas por la Norma IEC 60947:

$$I_{Carga} \leq I_{Regulada} \leq I_{(adm)cable} \quad (175)$$

$$181 [A] \leq 181 [A] \leq 174 [A] \quad (176)$$

A partir de la ecuación presentada, se observa que la condición de que la corriente admisible sea menor que la corriente regulada y la corriente de carga no se satisface. Este

incumplimiento se explica por la existencia de un pico de demanda máximo. Como se explicó previamente, dado que el material aislante es polietileno reticulado (XLPE), clasificado como termoestable, el cable posee una capacidad de sobrecarga térmica transitoria que le permite soportar este régimen de operación sin un fallo inmediato, siempre que la duración y magnitud de la sobrecarga estén dentro de los límites establecidos por la normativa técnica aplicable.

Por otro lado, debe verificarse que la protección actúe para una corriente menor al 30% de la corriente nominal del cable:

$$I_{\text{Funcionamiento}} \leq 1,45 * I_{\text{cable}} \quad (177)$$

$$I_F = 1,3 * I_{\text{Regulada}} \quad (178)$$

$$1,3 \cdot 181[A] \leq 1,45 \cdot 174 [A] \quad (179)$$

$$235,3 [A] \leq 252,3 [A] \quad (180)$$

Cable alternador - taladro

Para el diseño de la protección del generador deben considerarse tanto la corriente nominal como la corriente de cortocircuito. Dado que la única impedancia entre el generador y el taladro es la del cable de enlace —de longitud mínima, ya que el grupo electrógeno se ubica lo más próximo posible al taladro—, es razonable suponer que en caso de producirse una falla será cercana al generador. En consecuencia, el dimensionamiento de la protección debe basarse en la corriente de cortocircuito subtransitoria. De acuerdo con la Figura 31 (hoja de datos del generador síncrono GPA de WEG), la corriente nominal del alternador es 2406 [A], mientras que la corriente subtransitoria de cortocircuito asciende a 91824,3 [A] (≈ 92 [kA]).

En base a estos parámetros, se seleccionó un interruptor automático limitador de corriente, modelo Masterpact MTZ2 de la marca Schneider Electric, por su capacidad de garantizar la seguridad operativa y la confiabilidad del sistema eléctrico ante condiciones de sobrecarga y cortocircuito.

Figura 115

Características											
					Masterpact MTZ1						
					De 630 a 1600 A						
Interruptor automático conforme a IEC/EN 60947-2											
Masterpact					06	08	10	12	16		
Intensidad nominal a 40/50 °C ⁽¹⁾	In (A)				630	800	1000	1250	1600		
Calibres del sensor	(A)				400	400	400	630	800		
					a 630	a 800	a 1000	a 1250	a 1600		
Masterpact					06 a 10			12 a 16			
Tipo					H1	H2	H3	L1 ⁽²⁾	H1	H2	H3
Poder de corte último	Icu (kArms)	220/415 V			42	50	66	150	42	50	66
Vca, 50/60 Hz		440 V			42	50	66	130	42	50	66
		500/525 V			42	42	-	100	42	42	-
		660/690 V			42	42	-	25	42	42	-
		1150 V			-	-	-	-	-	-	-
Poder de corte en servicio	Ics (kArms)	% Icu			100	100	75 ⁽⁴⁾	100	100	100	75 ⁽⁴⁾
Categoría de empleo ⁽³⁾					B	B	A	B	B	B	B
Intensidad de corta duración admisible	Icw (kArms)	0,5 s			42	50	10	42	42	50	42
Vca, 50/60 Hz		1 s			42	50	50	-	42	50	42
		3 s			24	24	30	-	24	24	30
Poder de cierre nominal	Icm (kA)	220/415 V			88	105	145	330	88	105	145
Vca, 50/60 Hz		440 V			88	105	145	286	88	105	145
		525 V			88	88	-	220	88	88	-
		690 V			88	88	-	52	88	88	-
		1150 V			-	-	-	-	-	-	-
Protección instantánea integrada (valor DIN kA instantáneo ±10%) ⁽²⁾					-	90	110	10 In	-	90	105
Tiempo de corte entre la orden de disparo y la extinción del arco	(ms)				25	25	25	9	25	25	25
Tiempo de cierre	(ms)				< 50				< 50		

Masterpact MTZ2										Masterpact MTZ3		
De 800 a 4000 A										De 4000 a 6300 A		
08	10	12	16	20	20	25	32	40	40	50	63	
800	1000	1250	1600	2000	2000	2500	3200	4000	4000	5000	6300	
400	400	630	800	1000	1000	1250	1600	2000	2000	2500	3200	
a 800	a 1000	a 1250	a 1600	a 2000	a 2000	a 2500	a 3200	a 4000	a 4000	a 5000	a 6300	
08 a 20					20	25 a 40			40 a 63			
N1	H1	H2	L1 ⁽²⁾	H10 ⁽²⁾	H3	H1	H2	H3	H10 ⁽²⁾	H1	H2	
42	66	85	150	-	150	66	85	150	-	100	150	
42	66	85	150	-	150	66	85	150	-	100	150	
42	66	85	130	-	130	66	85	130	-	100	130	
42	66	85	100	-	100	66	85	100	-	100	100	
-	-	-	-	50	-	-	-	-	50	-	-	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
66	66	66	85	30	50	66	85	66	75	100	100	
66	66	66	85	30	50	66	85	66	75	100	100	
22	36	36	50	30	50	66	66	36	75	100	100	
88	145	220	330	-	330	145	220	330	-	220	330	
88	145	220	330	-	330	145	220	330	-	220	330	
88	145	187	286	-	286	145	187	286	-	220	286	
88	145	187	220	-	220	145	187	220	-	220	220	
-	-	-	-	105	-	-	-	-	105	-	-	
-	-	190	80	-	150	-	190	150	-	-	270	
25	25	25	10	25	25	25	25	25	25	25	25	
< 70					< 70	< 70				< 80		

Nota: Características eléctricas de interruptores automáticos MTZ marca Schneider.

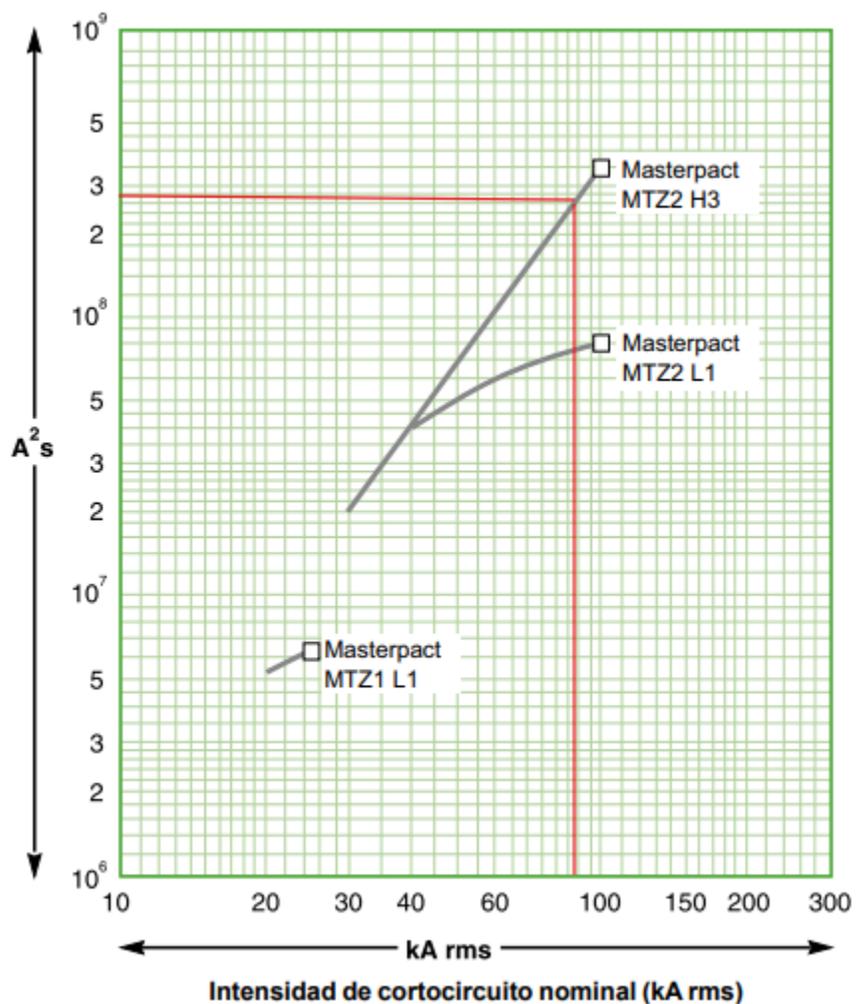
De la gama disponible de dicho modelo se seleccionó la versión con corriente nominal de 3200 [A], correspondiente al tipo H3, el cual posee una capacidad de ruptura de 100 [kA] para una tensión de 660/690 [V].

Por lo tanto, se cumple que el poder de corte último es mayor igual a la corriente de cortocircuito subtransitoria.

$$92 [kA] \leq 100 [kA] \quad (181)$$

Luego, la máxima energía específica que deja pasar el interruptor se obtiene del siguiente gráfico.

Figura 116



Nota: Energía específica que deja pasar cada interruptor.

Para una corriente de cortocircuito nominal de 92 [kA], la máxima energía específica que va a dejar pasar el interruptor es de 280.000.000 [A²s].

A partir de la Figura 114 y siendo que el cable es de aluminio y está aislado con XLPE, K es igual a 93. Luego, la sección mínima del cable resulta (Expresión derivada de la Ecuación 170):

$$S \geq \sqrt{\frac{I^2 t}{k^2}} \quad (182)$$

$$S \geq \sqrt{\frac{280.000.000 A^2 s}{93^2}} \quad (183)$$

$$S \geq 180 [mm^2] \quad (184)$$

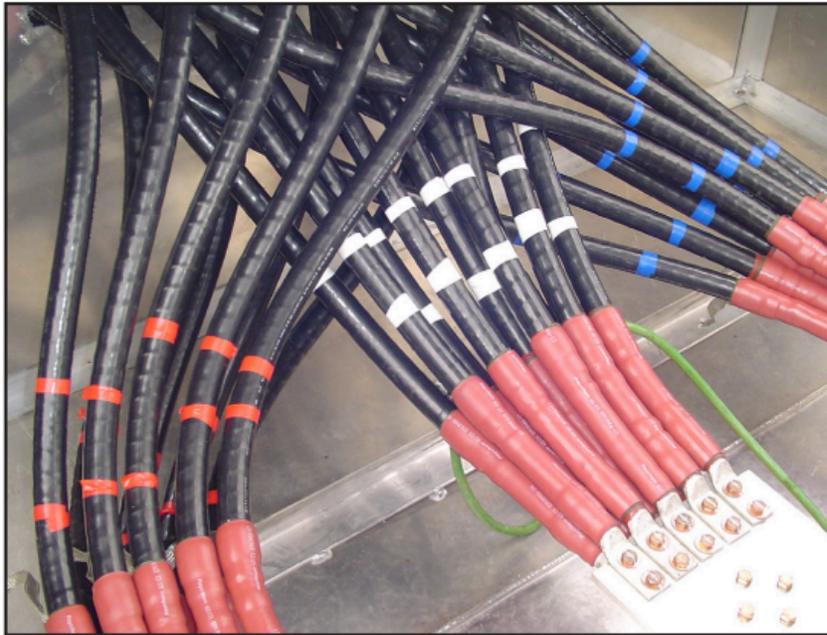
La sección del cable debe ser de por lo menos de $185 [mm^2]$. Sin embargo, esta sección de cable tiene una corriente nominal (323 [A]) muy por debajo de la que consume el taladro. En realidad, no hay cables tripolares comerciales que puedan transportar corrientes superiores a los 2000 [A]. Por ello se evalúa emplear un bus de cables como el sistema MP Husky, que utiliza varios conductores aislados en paralelo dentro de un conducto ventilado.

Figura 117

Nota: Bus de cables de la marca MP Husky.

“El manual técnico de MP Husky explica que utilizar más de un conductor por fase aporta ventajas: los amper por unidad de sección decrece a medida que aumenta el tamaño del cable, mientras que los conductores más pequeños, dispuestos en paralelo, son más flexibles y ofrecen mayor capacidad de conducción que unos pocos conductores de gran sección. Esto permite dimensionar el cable *bus* para 2406 [A] empleando, por ejemplo, cuatro o cinco cables por fase de sección moderada, con mejor disipación térmica y facilidad de instalación. El sistema de MP Husky mantiene un espaciamiento uniforme entre cables y usa bloques de soporte para equilibrar la corriente entre fases y dentro de cada fase; en el manual se indica que cada fase puede tener uno o más cables conectados en paralelo y que el conjunto se aloja en un conducto de aluminio ventilado.”(MP Husky, 2024).

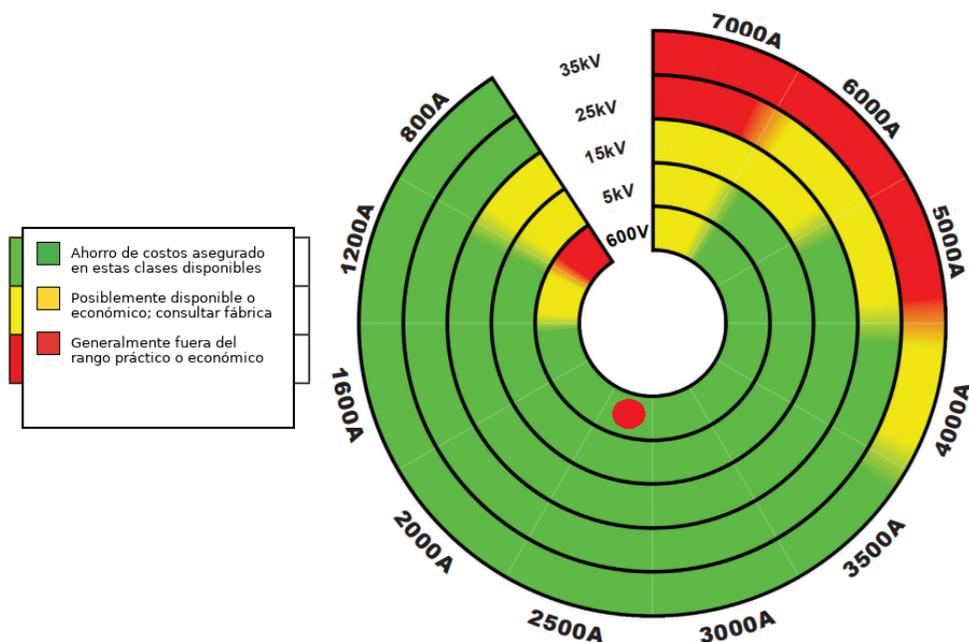
Por otro lado, el *bus* ha sido sometido a ensayos de cortocircuito de 39 [kA] hasta 200 [kA] RMS simétricos y resistió sin daños los esfuerzos, demostrando su idoneidad para soportar cortocircuitos de alternadores de gran potencia, como el de 92 [kA] que declara la hoja de datos del GPA 500.

Figura 118

Nota: Múltiples conductores por fase para llegar al amperaje necesario.

MP Husky señala que este cable *bus* se utiliza habitualmente en alimentadores principales como la conexión de subestaciones, generadores o transformadores a celdas de conmutación y grandes máquinas, como el taladro. Además, como se observa en el siguiente gráfico provisto por el fabricante, para las características del sistema, la implementación del *bus* de cables permitirá un ahorro de costos asegurado.

Figura 119



Nota: Viabilidad de la implementación del bus de cables en función de la tensión y la corriente.

Por otro lado, para unir el cable *bus* con equipos existentes, MP Husky ofrece conectores de caja tipo BC fabricados en aluminio o acero inoxidable; estos conectores están diseñados para terminar sistemas de cable *bus* en interruptores o estructuras metálicas y se suministran con la tornillería necesaria. Estos conectores tipo BC permiten fijar las terminaciones del cable *bus* a las placas del interruptor seleccionado con la tornillería adecuada; las barras o cables se apoyan en el ducto y en los soportes externos, de modo que no cargan sobre el MTZ2. Esto es fundamental ya que “los manuales de Schneider Electric para este tipo de interruptores indican que las barras o cables deben ajustarse de modo que sus extremos coincidan con las placas terminales del interruptor y que el peso de la conexión sea soportado por un soporte mecánico, no por las terminales del interruptor.”(Merlin Gerin, 1997).

En conclusión, para un alternador que suministra 2406 [A] a 600 [V] a un taladro de perforación, un sistema de Cable Bus MP Husky ofrece ventajas prácticas y de seguridad: permite manejar altas corrientes mediante múltiples conductores en paralelo, garantiza un diseño equilibrado y ensayado para fuertes cortocircuitos y está pensado para conexiones principales de generadores a grandes equipos. Los conectores de terminación facilitan la unión con interruptores y cumplen las recomendaciones de Schneider para el interruptor MTZ2 de 3200 [A] respecto al soporte mecánico y la disposición de cables. Por ello, el uso de un cable *bus* como el de MP Husky constituye una solución técnica coherente y segura para la instalación planteada.

Seccionadores sin carga

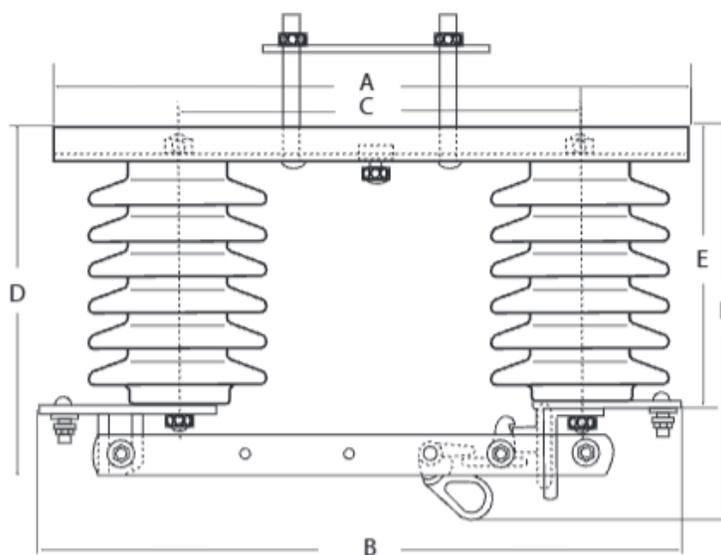
Con el objetivo de garantizar una separación visible y segura que permita realizar labores de mantenimiento sin riesgo eléctrico, se seleccionaron dos juegos de tres seccionadores unipolares a cuchilla, extraídos del catálogo de Dosen. Estos dispositivos cumplen la función de aislar el sistema o subsistemas eléctricos, protegiendo tanto al personal de operación como a los equipos frente a posibles incidentes durante las intervenciones.

Figura 120

Denominación		Unidad	UAC
Tensión nominal	kVef	15	35
Intensidad nominal		600	600
Intensidad máx. admisible durante 1 segundo	kVef	20	20
Tensión de ensayo a frecuencia industrial durante 1 minuto bajo lluvia:			
Seccionador cerrado	kVef	45	75
Seccionador abierto	kVef	60	100
Tensión de ensayo a impulso, onda 1,2/50 useg. sin descarga: bajo lluvia:			
Seccionador cerrado	kVc	95	170
Seccionador abierto	kVc	110	190
Peso	kg	8,9	12,7

Nota: Características eléctricas de seccionadores.

Figura 121



Nota: Representación gráfica de los seccionadores.

Figura 122

	A	B	C	D	E	F	Embalaje
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Unidad
15 kV	435	470	300	245	195	285	1
24 kV	540	580	380	300	250	340	1
35 kV	540	580	380	365	315	405	1

Nota: Dimensiones de los seccionadores.

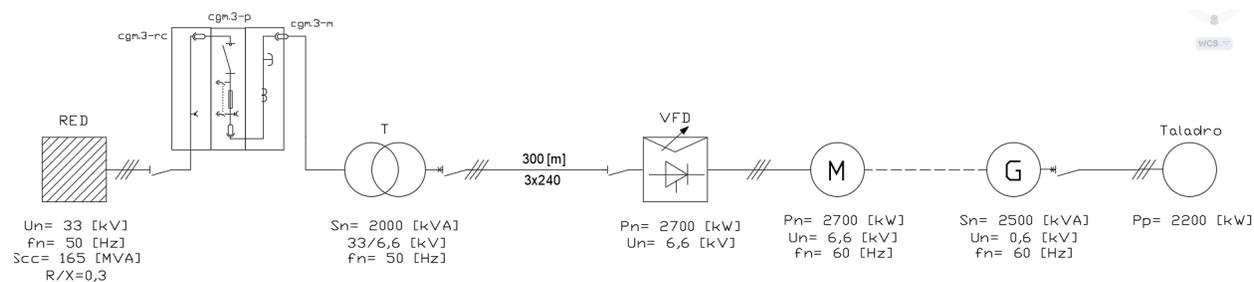
El primer juego corresponde a seccionadores con tensión nominal de 33 [kV], ubicados aguas arriba de la celda de remonte del primer tráiler. El segundo juego se seleccionó con tensión nominal de 15 [kV] y se instaló aguas arriba al variador de frecuencia, es decir, antes del segundo tráiler.

Esta disposición asegura la existencia de puntos de desconexión claramente visibles en ambos ramales principales del sistema, reforzando la confiabilidad operativa y la seguridad durante el mantenimiento.

Esquema unifilar

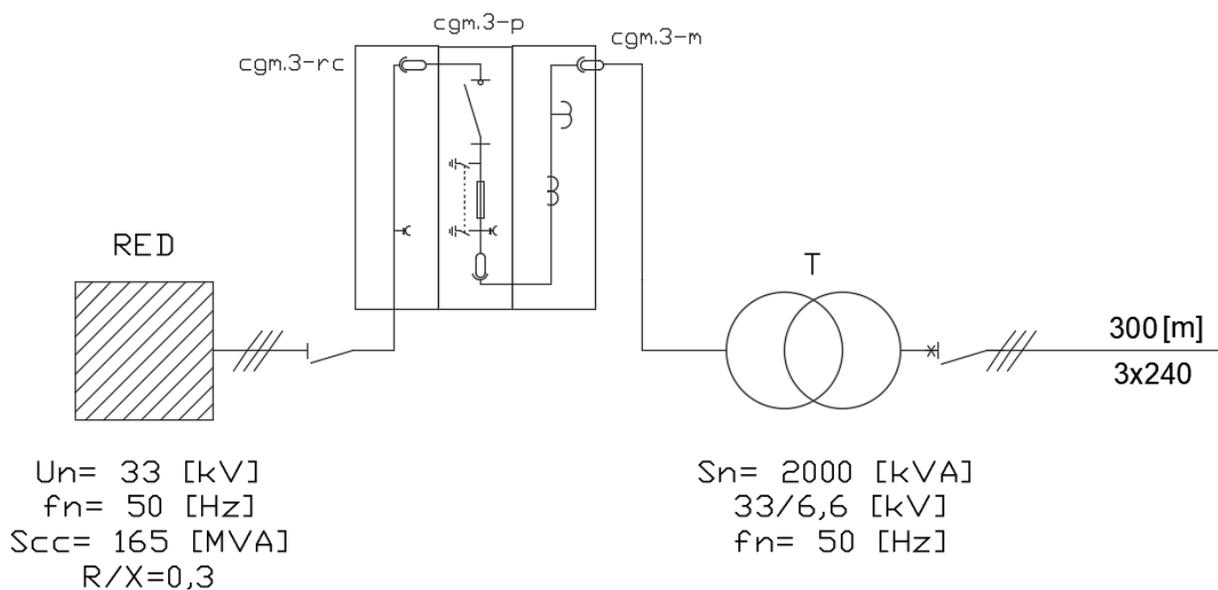
Una vez descritos todos los componentes, se realizó un esquema unifilar de la solución propuesta con las características principales de cada equipo.

Figura 123



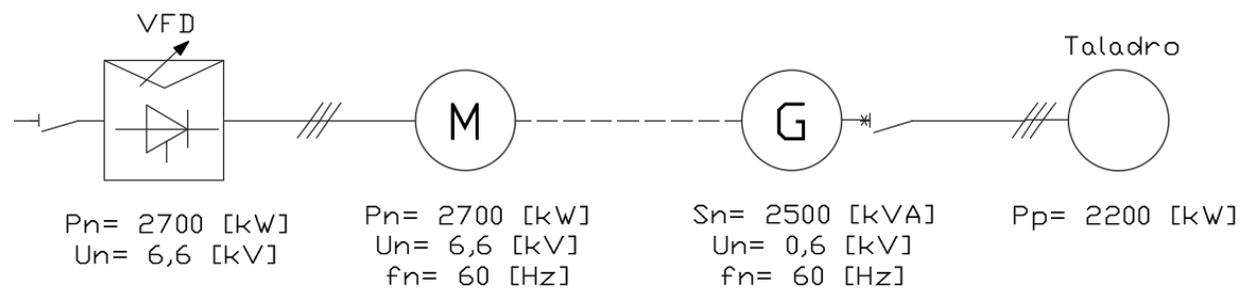
Nota. Esquema unifilar completo de la primera alternativa.

Figura 124



Nota. Esquema unifilar de la estación transformadora móvil.

Figura 125



Nota. Esquema unifilar del genset.

Alternativa 2

Otra alternativa para alcanzar la frecuencia de 60 [Hz] que requiere el taladro consiste en incorporar una caja reductora que permita adecuar la velocidad de rotación del generador. Esto se fundamenta en la relación directa entre la velocidad angular del generador y la frecuencia de salida, previamente demostrada.

“En la industria, los reductores son componentes esenciales en la transmisión de potencia mecánica. Su función principal es disminuir la velocidad de rotación de un eje y, simultáneamente, aumentar el par. Este equilibrio es fundamental para el correcto funcionamiento de diversos sistemas mecánicos y eléctricos, asegurando la adaptación adecuada de las velocidades y fuerzas requeridas para cada proceso. El funcionamiento de un reductor se basa en un sistema de engranajes que transforman la velocidad y el par. Cuando la energía cinética entra al reductor a través de un eje motriz, esta energía es transmitida a un engranaje de mayor tamaño, el cual, a su vez, mueve un engranaje de menor tamaño en el eje de salida. Este proceso reduce la velocidad de rotación, mientras aumenta el par. Este mecanismo es ampliamente utilizado en situaciones donde se requiere un control preciso de la velocidad y fuerza aplicada.” (Guía completa de reductores, 2024).

En esta alternativa, al no contar con la presencia del variador de frecuencia, se deberá utilizar un motor sincrónico en lugar de uno asíncrono como el que se utiliza en la primera opción, ya que estos motores sufren resbalamiento, lo que significa que su velocidad disminuye cuando la carga aumenta, y aumenta cuando la carga disminuye; en este caso, la carga es muy variable y exige rápidas respuestas ante los cambios. Este comportamiento afecta la velocidad de giro del generador, y por lo tanto la frecuencia generada puede variar, lo que no es aceptable ya que la frecuencia de salida del generador debe mantenerse constante.

Por su parte, “los motores síncronos funcionan a una velocidad constante, independientemente de la carga que actúe sobre ellos. Son motores muy eficientes que se

adaptan mejor a aplicaciones de alta precisión. La interacción entre un campo magnético giratorio y uno constante hace que el motor funcione a velocidad constante. El campo magnético giratorio es producido por el estator del motor síncrono, mientras que el rotor crea un campo magnético constante. El estator de la bobina de campo es excitado por una alimentación de CA trifásica y produce un campo magnético giratorio con una velocidad síncrona. Al mismo tiempo, el rotor es excitado por una fuente de alimentación de CC y actúa como un imán permanente. Además, el rotor puede ser de imanes permanentes.” (Diferencia entre Motores Síncronos y Asíncronos, s.f.).

“ El motor sincrónico funciona a velocidad constante; mientras esté sincronizado, mantiene la velocidad independientemente de la carga. La única forma de variar la velocidad es modificando la frecuencia de alimentación. Cuando la carga aumenta, el rotor no cambia su velocidad sino que retrocede en fase; el ángulo de par (δ) entre los campos del rotor y del estator aumenta para desarrollar más par. La máquina continúa girando a velocidad síncrona siempre que la carga no supere el par de pérdida de sincronismo.

La velocidad síncrona depende directamente de la frecuencia de la red. Las redes industriales mantienen la frecuencia con variaciones muy pequeñas ($\pm 0,1-0,5$ [Hz]). Esas oscilaciones producen pequeñas variaciones de velocidad, que normalmente no afectan aplicaciones mecánicas.” (NIT-edu.org, 2021).

Una de las desventajas que presentan los motores sincrónicos respecto a los asíncronos, es que no son autoarrancables, ya que el rotor necesita una rotación inicial. “Para que el motor síncrono sea autoarrancable, se instala una jaula de ardilla en las puntas de los polos. Al arrancar, las bobinas del rotor no reciben corriente, pero con el campo magnético giratorio se induce electricidad en las barras de la jaula de ardilla y el rotor empieza a girar. Los polos opuestos del rotor y del campo magnético giratorio se atraen y se bloquean

magnéticamente, lo que hace que el rotor gire a la misma velocidad que el campo magnético giratorio.” (Diferencia entre Motores Síncronos y Asíncronos, s.f.).

La otra gran desventaja de los motores síncronos es su precio. Los motores síncronos son más caros que los motores asíncronos principalmente por su mayor complejidad constructiva y los componentes adicionales que requieren. Como se mencionó previamente, el motor síncrono requiere de un sistema de excitación, lo que incrementa su costo de fabricación, instalación y mantenimiento. Además, su arranque y sincronización con la red requieren sistemas de control más sofisticados. En contraste, los motores asíncronos son más simples, robustos y estandarizados, lo que permite una producción masiva a menor costo.

Dimensionamiento de equipos

Motor síncrono

Para el análisis de la caja reductora se considera un motor síncrono con una potencia nominal equivalente a la del motor de inducción utilizado en la opción 1, es decir, 2700 [kW]. De acuerdo con la información técnica provista por WEG, las cajas Helimax de engranajes paralelos presentan una eficiencia comprendida entre el 94 % y el 98 %, valor comparable con la eficiencia de un variador de frecuencia, que se sitúa en torno al 96 %. En consecuencia, resulta consistente emplear un motor de la misma potencia para accionar el alternador, dado que las pérdidas asociadas a la caja reductora son equivalentes a las originadas en el variador. Como referencia, se selecciona un motor síncrono de la línea S de WEG.

Figura 126

Nota. Motor sincrónico trifásico Línea S de la marca WEG.

Caja reductora

Se procede a dimensionar la caja reductora para obtener las revoluciones por minuto necesarias a la salida del eje. Para ello, se decidió utilizar reductores Helimax de la marca WEG. Estas cajas reductoras son engranajes cilíndricos con dientes helicoidales y ejes paralelos, con dichos dientes para obtener un contacto gradual entre el flanco del par de dientes y poder reducir el impacto en el periodo de arranque.

En primer lugar, para seleccionar la caja, se obtiene la potencia mecánica nominal (P_n), que es la máxima potencia que la caja puede transmitir mecánicamente en base al torque y la velocidad de salida. Dicho valor se calcula mediante la potencia del motor (P_a) y un factor de

servicio (Fs) que tiene en cuenta el tipo de máquina accionada, la carga aplicada y el funcionamiento. Este factor se obtiene de la siguiente Figura:

Figura 127

FACTOR DE SERVICIO - Fs							
SOLICITUD	PERIODO DE OPERACIÓN POR DÍA			SOLICITUD	PERIODO DE OPERACIÓN POR DÍA		
	<3 horas	3-10h	>10h		<3 horas	3-10h	>10h
AGITADORES Y MEZCLADORES				INDUSTRIA DEL CEMENTO			
Líquidos puros	1.00	1.00	1.25	Trituradora de mandíbulas	2.00	2.00	2.00
Líquidos y sólidos	1.00	1.25	1.50	Molino rotatorio	2.00	2.00	2.00
Líquidos de densidad variable	1.00	1.25	1.50	Molino de bolas y rodillos	2.00	2.00	2.00
ZAPATILLAS				homos rotatorios	2.00	2.00	2.00
Centrifugas	1.00	1.25	1.50	Separadores	1.50	1.50	1.50
Recíproco (cilindro único)	1.50	1.50	1.75	Trituradora de rodillos	2.00	2.00	2.00
Recíproco (multicilindro)	1.25	1.50	1.50	INDUSTRIA DE LA MADERA			
Engranajes rotativos	1.25	1.25	1.50	Alimentadores de cepilladoras	1.25	1.25	1.50
Presas rotativas de paletas	1.25	1.25	1.50	Maquinaria para trabajar la madera (general)	1.25	1.25	1.50
Helicoidal	1.25	1.25	1.50	montañas	1.75	1.75	2.00
COMPRESORES				INDUSTRIA DE PULPA Y PAPEL			
Centrifugas	1.25	1.25	1.50	Balidoses	1.75	1.75	2.00
Tornillos	1.50	1.50	1.75	Calendarios	1.75	1.75	2.00
Recíprocos - multicilindros	1.50	1.50	1.75	Peladores	1.50	1.75	2.00
Recíprocos - cilindro único	1.75	1.75	2.00	Despulpadoras	1.50	1.75	2.00
DRAGAS				Filtros	1.75	1.75	2.00
Zapatillas	2.00	2.00	2.00	Máquina de papel	2.00	2.00	2.00
Cabezas rotatorias	2.00	2.00	2.00	Trituradoras	1.75	1.75	2.00
Cabestantes	1.25	1.25	1.50	Presas	1.75	1.75	1.75
Tamices	1.75	1.75	2.00	Secadoras	1.75	1.75	2.00
Transportadores	1.25	1.50	1.50	INDUSTRIA METALÚRGICA			
ASCENSORES				Cortadoras de chapa de disco rotativo	1.50	1.75	2.00
Ascensores de carga	1.25	1.25	1.50	Cortadores de placas de cuchillo	1.50	1.75	2.00
Ascensores de pasajeros	#	#	#	Máquinas dobladoras	1.25	1.50	1.75
Escaleras mecánicas	1.25	1.25	1.50	Rodillos tensores	1.50	1.75	2.00
ENERGÍA				Carrete de cable	1.25	1.50	1.50
Convertidores de frecuencia	2.00	2.00	2.00	laminadores	1.50	1.50	1.50
Generadores hidráulicos (baja velocidad)	1.75	1.75	1.75	montañas	1.00	1.25	1.50
turbinas hidráulicas	#	#	#	Bobinadoras y desbobinadoras	1.50	1.50	1.75
EXTRUSORAS				Mesa transportadora	2.00	2.00	2.00
Plástico	1.50	1.50	1.50	Tijeras	2.00	2.00	2.00
Goma	1.75	1.75	1.75	INDUSTRIA ALIMENTARIA			
Cereal	2.00	2.00	2.00	Centrifugas	1.75	1.75	2.00
INDUSTRIA ALIMENTARIA				Cortadores	1.25	1.25	1.50
Centrifugas	1.75	1.75	2.00	Cocinas de omeales	1.25	1.25	1.50
Cortadores	1.25	1.25	1.50	Desolvilizador de tostadoras (DT)	2.00	2.00	2.00
Cocinas de omeales	1.25	1.25	1.50	Mezcladores	1.25	1.25	1.50
Desolvilizador de tostadoras (DT)	2.00	2.00	2.00	Molinos y trituradoras	1.50	1.50	1.75
Mezcladores	1.25	1.25	1.50	Presas	2.00	2.00	2.00
Molinos y trituradoras	1.50	1.50	1.75	Secadores rotativos	1.25	1.25	1.50
Molinos de martillos	2.00	2.00	2.00	INDUSTRIA DEL AZÚCAR Y EL ETANOL			
Molino de carbón	1.50	1.50	1.75	Agitadores de baja velocidad	1.50	1.50	1.50
Secadoras	1.50	1.50	1.75	Agitadores de alta velocidad	2.00	2.00	2.00
Enfriadores	1.50	1.50	1.75	Crystalizadores	1.75	1.75	1.75
MINERÍA				2.50	2.50	2.50	
Accionamientos de giro	1.50	1.50	1.75	2.00	2.00	2.00	
excavadoras	#	#	#	2.00	2.00	2.00	
Trituradoras	1.75	1.75	2.00	2.00	2.00	2.00	
Vibradores	1.75	1.75	2.00	2.00	2.00	2.00	
MOLINOS Y TAMBORES ROTATIVOS				2.00	2.00	2.00	
Molino de bolas y rodillos	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
Molino de martillos	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
Molino de carbón	1.50	1.50	1.75	2.00	2.00	2.00	
Secadoras	1.50	1.50	1.75	2.00	2.00	2.00	
Enfriadores	1.50	1.50	1.75	2.00	2.00	2.00	
SISTEMAS DE GRÚA				2.00	2.00	2.00	
Grúas	#	#	#	2.00	2.00	2.00	
Ascensores de carga	#	#	#	2.00	2.00	2.00	
TRANSPORTADORES				2.00	2.00	2.00	
Elevador de canglones	1.25	1.25	1.50	2.00	2.00	2.00	
Transportadores de banda <= 100 kW	1.25	1.25	1.50	2.00	2.00	2.00	
Transportadores de banda > 100 kW	1.25	1.50	1.75	2.00	2.00	2.00	
Transportadores de tomillo	1.25	1.25	1.50	2.00	2.00	2.00	
Vibradores	1.75	1.75	2.00	2.00	2.00	2.00	

FACTOR DE SERVICIO - Fs								
SOLICITUD	PERIODO DE OPERACIÓN POR DÍA			SOLICITUD	PERIODO DE OPERACIÓN POR DÍA			
	<3 tone	3-10h	>10h		<3 tone	3-10h	>10h	
	INDUSTRIA DEL CAUCHO				TRATAMIENTO DE AGUA Y SANEAMIENTO			
Calendarios	1.50	1.50	1.75	Aireadores	2.00	2.00	2.00	
Extrusoras	1.75	1.75	1.75	Alimentadores químicos	1.25	1.25	1.25	
Mezcladores	2.00	2.00	2.00	Bombas de tornillo	1.25	1.25	1.50	
Molinos de calefacción	1.50	1.50	1.75	Calcoionistas	1.25	1.25	1.50	
2 molinos cilíndricos en línea	1.75	1.75	2.00	Espesantes	1.50	1.50	1.50	
3 molinos cilíndricos en línea	1.50	1.50	1.75	Filtros de vacío	1.50	1.50	1.50	
laminadores	1.50	1.75	2.00	Tamices	1.50	1.50	1.50 1.50	
Trituradoras	1.50	1.75	2.00	AFICIONADOS				
INDUSTRIA CERÁMICA			Centrifugas			1.00	1.00	1.25
Amasadoras de arcilla	1.00	1.25	1.50	Industrial y minera	1.75	1.75	1.75	
Mezcladores	1.00	1.25	1.50	Sopladores (forzados)	1.50	1.50	1.50	
Molinos de arcilla	#	#	#	Torres de enfriamiento	#	#	#	
Presas para ladrillos y tejas	1.50	1.75	2.00	Intercambiadores de calor	1.50	1.50	1.50	
			GRÚAS PUENTES			#	#	#
# Consultar WEG-CESTARI								
IMPORTANTE: Para motores de combustión, proceder como se describe a continuación:								
- Motores de combustión de 4 o más cilindros: Fs (tabla de selección) + 0,25								
- Motores de combustión de 1 a 3 cilindros: Fs (tabla de selección) + 0,50								

Nota: Tabla del factor de servicio para distintas aplicaciones y periodos de operación.

Al no estar presente el tipo de aplicación específico en la tabla anterior, se optó por elegir, mediante un criterio conservador, el mayor factor de servicio, que equivale a dos.

Entonces, la potencia mecánica nominal resulta:

$$P_n = P_a * F_s \quad (185)$$

Siendo:

- $P_a = 2700 [kW]$
- $F_s = 2$

Luego:

$$P_n = 2700 [kW] * 2 = 5400 [kW] \quad (186)$$

Luego, sabiendo la frecuencia de entrada y de salida se determina la relación de transmisión:

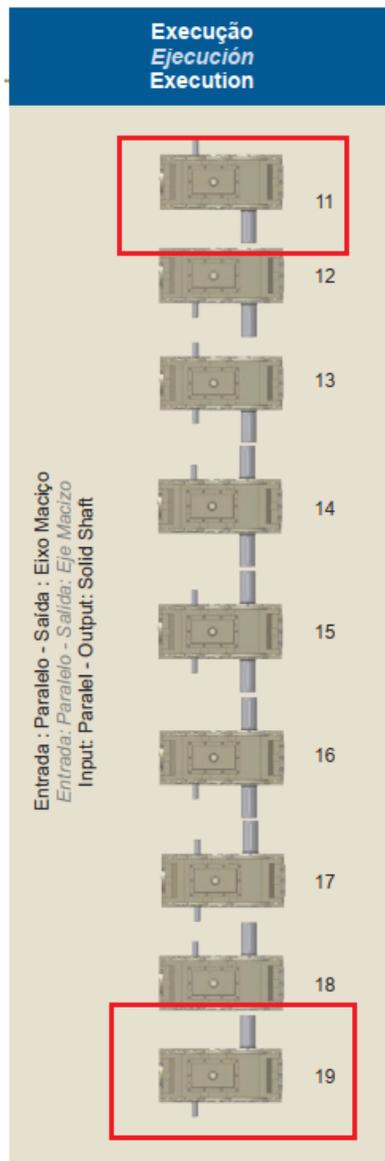
$$i = f_2/f_1 = 60 [Hz]/50 [Hz] = 1,25 \quad (187)$$

Para que la comparación sea justa, se considera que el alternador es el mismo que en la Alternativa 1, es decir que gira a 1800 [rpm] para generar los 60 [Hz] de frecuencia que requiere el taladro. Por otro lado, como el motor sincrónico está a la frecuencia de la red (50 [Hz]) va a girar a la siguiente velocidad:

$$n_m = \frac{50 \text{ [Hz]} * 120}{4 \text{ [polos]}} = 1500 \text{ [rpm]} \quad (188)$$

Por ende, la caja debe funcionar como multiplicadora de velocidad, no como reductora. Se debe verificar que la misma pueda cumplir esta función. En el manual provisto por WEG, se muestran las distintas opciones de ejecución de las cajas Helimax de una sólo etapa:

Figura 128



Nota: Configuraciones posibles cajas Helimax de una sólo etapa.

Al analizar la configuración 11, se observa que el eje de entrada presenta un diámetro menor, lo cual indica que opera a mayor velocidad, mientras que el eje de salida, de mayor diámetro, gira a menor velocidad. En esta disposición, la caja actúa como reductora. En cambio, en la configuración 19, los ejes se encuentran dispuestos en sentido inverso: el eje de menor diámetro (y por ende, mayor velocidad) se ubica en la salida. Por lo tanto, en esta

configuración la caja funciona como multiplicadora. A diferencia del uso convencional como reductor, en este caso la verificación crítica debe realizarse sobre el eje de entrada, ya que al girar a menor velocidad será el que transmita el mayor torque y, en consecuencia, el más exigido desde el punto de vista mecánico. Luego, la relación de transmisión verdadera resulta:

$$i = n_2/n_1 = 1800 \text{ [rpm]}/1500 \text{ [rpm]} = 1,2 \quad (189)$$

A partir de estos datos se selecciona del catálogo un reductor de una etapa, que cumpla que la potencia mecánica sea mayor a la potencia mecánica nominal, es decir:

$$P_1 \geq P_n \quad (190)$$

Figura 129

	n1 [rpm] Input speed	Redução Nominal Reducción Nominal Nominal Ratio							
		1,12	1,25	1,40	1,60	1,80	2,00	2,25	2,50
20	1800	1300	1300	1180	1100	1000	950	890	810
	1200	1000	950	890	830	780	680	625	565
	900	800	790	750	630	580	510	465	425
23	1800	1850	1800	1600	1500	1400	1320	1200	1100
	1200	1325	1250	1170	1060	980	905	795	730
	900	995	935	880	790	735	680	595	550
25	1800	2700	2500	2400	2200	2100	1940	1800	1600
	1200	1900	1775	1660	1540	1430	1320	1250	1140
	900	1650	1300	1240	1150	1070	990	940	860
28	1800	3500	3350	3150	2900	2700	2500	2300	2160
	1200	2600	2500	2350	2200	2000	1900	1740	1600
	900	2010	1950	1820	1690	1500	1500	1310	1250
32	1800	5000	4700	4400	4100	3900	3600	3300	3000
	1200	3380	3290	3000	2820	2630	2440	2250	2050
	900	2530	2460	2250	2110	1970	1830	1690	1550
36	1800	6700	6350	6000	5560	5100	4850	4400	4100
	1200	4950	4680	4280	4000	3750	3480	3300	2940
	900	3700	3500	3200	3000	2800	2600	2500	2200
40	1800	8400	8000	7450	6900	6500	6000	5600	5100
	1200	6170	5870	5400	5100	4670	4325	4050	3750
	900	4630	4400	4050	3820	3500	3270	3050	2820
46	1800	11600	11000	10000	9700	9100	8400	7900	7200
	1200	8700	8300	7800	7150	6750	6330	5700	5400
	900	6650	6300	5850	5380	5070	4750	4270	4110

Nota: Potencia mecánica en función de la reducción nominal.

Se observa que el primer modelo que cumple con que la potencia mecánica sea mayor a la potencia nominal es el E36 (se utiliza la relación de transmisión 1,25 ya que es la que más se aproxima a la real que se necesita):

$$6350 [kW] \geq 5400 [kW] \quad (191)$$

A continuación se procede a realizar la verificación por torque. Se debe verificar que el torque máximo admisible en el eje de entrada (por funcionar como multiplicador) sea mayor al torque máximo en el eje de entrada, es decir:

$$M_{k2_{admisible}} \geq M_{k2_{m\acute{a}x}} \quad (192)$$

Siendo:

- $M_{k2_{admisible}} = \frac{2 * M_{n2}}{F_f}$
- $M_{k2_{m\acute{a}x}} = \frac{9550 * P_n}{n_1} * F_p$

En primer lugar se calcula el máximo torque en el eje de entrada, $M_{k2_{m\acute{a}x}}$:

- P_n (Potencia mecánica nominal) = 5400 [kW]
- $n_1 = 1500$ [rpm]
- F_p : factor por método de arranque. Se determina a partir de la siguiente figura:

Figura 130

FACTOR DE INICIO - Fp	
Tipo de coincidencia	Fp
Directo	3.0
Arranque suave	1.8
Inversor de frecuencia	1.8
Acoplamiento hidráulico sin cámara de retardo	2.0
Acoplamiento hidráulico con cámara de retardo	1.5

Nota: Factor por método de arranque.

Luego, el torque máximo en el eje de entrada resulta:

$$M_{k2_{m\acute{a}x}} = \frac{9550 * 5400 [kW]}{1500 [rpm]} * 1,8 = 61884 [Nm] \quad (193)$$

Se procede ahora a calcular el máximo torque admisible en el eje de entrada:

- M_{n2} : torque nominal en el eje de entrada. Se calcula de la siguiente manera:

$$M_{n2} = \frac{9550 * P_n}{n_1} = \frac{9550 * 5400 [kW]}{1500 [rpm]} = 34380 [Nm] \quad (194)$$

- F_f : factor por pico de carga. Se considera 1 ya que la caja está dimensionada para la máxima potencia consumida por el taladro.

Luego, el torque máximo admisible en el eje de entrada resulta:

$$M_{k2_{admisible}} = \frac{2 * 34380 [Nm]}{1} = 68760 [Nm] \quad (195)$$

Se verifica que:

$$68760 [Nm] \geq 61884 [Nm] \quad (196)$$

Por último, se debe verificar la caja por potencia térmica, que es la potencia máxima que la caja puede disipar sin sobrecalentarse, que depende principalmente del tipo de refrigeración.

Las cajas Helimax cuentan con las siguientes opciones:

- PTG: Potencia térmica natural.
- PTK: Potencia térmica con refrigeración, intercambiador de calor agua-aceite.
- PTC: Potencia térmica con refrigeración, serpentín agua-aceite.
- PTF.4: Potencia térmica con un ventilador en el eje de alta velocidad (1800 [rpm])

- PTF.6: Potencia térmica con un ventilador en el eje de baja velocidad (1500 [rpm])

El cálculo de la potencia térmica se realiza de la siguiente manera:

$$P_T = (PTG, PTK, PTC, PTF. 4 \text{ or } PTF. 6) * f_a * f_b * f_c * f_t \geq P_a \quad (197)$$

Siendo:

- f_a : Factor para temperatura ambiente
- f_b : Factor de duración de la operación
- f_c : Factor de medio ambiente
- f_t : Factor de temperatura del aceite
- P_a : Potencia del motor

En general, la potencia térmica de una caja reductora es considerablemente inferior a su capacidad mecánica, por lo que suele constituir el factor más crítico en el proceso de selección. En este contexto, es probable que el modelo E36 no cumpla con los requerimientos debido a su capacidad limitada de disipación térmica. Por tal motivo, con el fin de evitar iteraciones innecesarias, se opta por determinar cuál es la potencia térmica mínima requerida para satisfacer la ecuación previa. A partir de este valor, se procede a seleccionar el modelo más adecuado, bajo el criterio de que, si la caja cumple con la exigencia térmica, también cumplirá con las condiciones de potencia mecánica y torque, dado que el modelo E36 representa el límite inferior admisible en esos aspectos. Luego:

$$P_T = (PTG, PTK, PTC, PTF. 4 \text{ or } PTF. 6) \geq \frac{P_a}{f_a * f_b * f_c * f_t} \quad (198)$$

Los factores de corrección se obtienen de la siguiente figura obtenida del catálogo de las cajas Helimax:

Figura 131

fa - Fator para temperatura ambiente <u>Factor para temperatura ambiente</u> Factor to ambient temperature								
Temperatura ambiente Temperature °C	10	18	25	30	40	43	50	
Fator fa / Factor fa	1,15	1,07	1,00	0,93	0,83	0,75	0,67	
fb - Fator de duração para operação <u>Factor de duración para la operación</u> Time under load per hour								
% Tempo operação/hora % Tiempo de operación/hora Operation time / hour				1,00 (contínuo)	0,80	0,70	0,40	0,20
Fator fb Factor fb				1,00	1,05	1,15	1,35	1,80
fc - Fator ambiente <u>Factor medio ambiente</u> Installation location				ft - Fator temperatura do óleo <u>Factor de temperatura del aceite</u> Factor Oil temperature				
Tipos do ambiente	Fator fc			Máxima temperatura de óleo desejada			Fator ft	
<i>Tipos de medio ambiente</i>	<i>Factor fc</i>			<i>Máxima temperatura del aceite deseada</i>			<i>Factor ft</i>	
Types environment	Factor fc			Maximum oil temperature desired			Factor ft	
Área aberta, fluxo de ar								
<u>El área abierta, flujo de aire</u> Open area airflow	> 3,7 m/s	1,40			85		0,81	
Fechado em área grande, fluxo de ar								
<i>Cerrado en área grande, flujo de aire</i>	> 1,4 m/s	1,00			95		1,00	
Enclosed large, airflow								
Fechado com pouco espaço, fluxo de ar					100			
<i>Cerrado con poco espacio, flujo de aire</i>	> 0,5 m/s	0,75			Requer óleo sintético <i>Requiere un aceite sintético</i>		1,13	
Closed with little space, airflow					Sinthetic oil required			

Nota: Factores de corrección para la potencia térmica.

En resumen:

- $f_a = 0,83$
- $f_b = 1$
- $f_c = 1,40$
- $f_t = 1$

Luego,

$$P_T = (PTG, PTK, PTC, PTF. 4 \text{ or } PTF. 6) \geq \frac{2700 [kW]}{0,83 * 1 * 1,40 * 1} \quad (199)$$

$$P_T = (PTG, PTK, PTC, PTF. 4 \text{ or } PTF. 6) \geq 2323,6 [kW] \quad (200)$$

La potencia térmica mínima requerida para satisfacer las condiciones de operación es de 2323,6 [kW]. A continuación, se presenta una tabla que detalla la potencia térmica que puede disipar cada modelo, en función del tipo de sistema de refrigeración incorporado y de la relación de reducción nominal:

Figura 132

Tamanho Tamaño Size	Redução Nominal Reducción Nominal Nominal Ratio															
	1,12	1,25	1,40	1,60	1,80	2,00	2,25	2,50	2,80	3,15	3,55	4,00	4,50	5,00	5,60	
20	PTG	150	155	160	168	170	180	187	192	193	200	204	208	212	219	225
	PTK	462	469	474	481	488	495	504	514	527	542	560	583	609	639	679
	PTC	359	365	370	378	383	391	399	408	417	429	443	459	478	500	529
	PTF.4	295	300	303	308	312	317	323	329	337	347	359	373	390	409	435
	PTF.6	202	206	208	211	214	217	221	228	235	240	248	258	268	281	298
23	PTG	190	198	200	205	212	221	230	234	245	258	267	270	272	277	280
	PTK	478	482	486	493	499	506	515	524	535	549	566	586	610	637	671
	PTC	383	388	392	398	404	412	421	428	439	453	467	482	498	518	542
	PTF.4	362	367	370	375	380	385	392	399	408	418	431	446	465	484	511
	PTF.6	248	251	254	257	261	275	280	287	295	306	319	332	350	355	365
25	PTG	240	244	254	265	270	275	280	290	298	312	320	328	337	341	350
	PTK	620	628	632	637	642	647	653	664	676	691	708	729	754	781	815
	PTC	495	501	507	514	519	524	530	541	551	566	580	597	616	636	662
	PTF.4	440	448	450	454	458	461	466	473	482	492	505	520	538	557	581
	PTF.6	302	307	309	316	324	330	338	346	357	369	382	399	405	415	420
28	PTG	300	315	335	340	355	360	369	375	385	392	412	419	425	435	450
	PTK	648	652	657	663	667	672	678	686	681	693	724	738	744	764	791
	PTC	533	541	551	556	564	569	576	583	583	594	621	633	639	655	678
	PTF.4	530	538	541	546	550	554	559	565	562	571	583	597	613	630	652
	PTF.6	360	400	409	420	432	447	462	470	480	492	516	525	530	540	562
32	PTG	380	398	412	428	437	446	458	469	475	480	488	500	525	532	540
	PTK	1005	1050	1102	1109	1116	1123	1132	1142	1157	1171	1190	1215	1245	1276	1315
	PTC	799	835	874	884	892	900	910	920	932	943	958	979	1007	1030	1059
	PTF.4	735	740	743	748	753	757	764	770	781	790	803	820	840	861	888
	PTF.6	516	519	524	528	535	542	551	562	576	590	609	615	620	628	640
36	PTG	450	462	475	490	497	524	532	550	568	582	594	618	628	635	650
	PTK	1120	1138	1140	1143	1147	1152	1159	1166	1180	1195	1214	1235	1235	1235	1259
	PTC	899	915	921	928	933	945	952	963	978	993	1009	1031	1035	1037	1058
	PTF.4	850	857	859	861	863	867	872	878	888	900	917	930	930	930	948
	PTF.6	598	602	609	617	627	638	650	678	682	695	705	745	755	778	785
40	PTG	510	525	545	555	568	574	594	622	634	650	662	675	690	720	740
	PTK	1684	1760	1765	1774	1788	1802	1820	1840	1860	1890	1920	1955	1955	1955	1995
	PTC	1297	1352	1362	1372	1385	1397	1415	1438	1455	1481	1505	1533	1538	1547	1581
	PTF.4	971	978	980	987	995	1003	1012	1023	1035	1050	1067	1087	1087	1087	1110
	PTF.6	670	671	672	677	682	688	750	800	825	880	885	885	885	890	895
46	PTG	620	645	672	690	720	735	744	765	790	815	825	844	865	880	900
	PTK	2105	2196	2200	2217	2234	2252	2273	2296	2324	2357	2396	2442	2442	2442	2492
	PTC	1615	1684	1696	1713	1734	1751	1768	1791	1818	1848	1878	1915	1922	1927	1967
	PTF.4	1110	1122	1125	1130	1134	1140	1149	1159	1171	1185	1201	1220	1220	1220	1241
	PTF.6	865	869	871	885	889	892	900	905	950	980	985	998	1025	1045	1065

Nota: Potencia térmica en función del tipo de refrigeración y la reducción nominal.

Como se puede observar en la tabla, el modelo estándar más grande de las cajas Helimax, el E46, para la relación de transmisión requerida, puede disipar como máximo 2196 [kW], por lo que ninguno de estos modelos verificaría. Sin embargo, WEG cuenta con otros cuatro modelos que están por fuera del catálogo: E50, E54, E58 y E65.

Dado que no se dispone de información específica sobre la potencia térmica disipada para estos modelos, se opta por realizar una extrapolación a partir de los datos disponibles en la Figura 132. Para ello, se consideran exclusivamente los valores correspondientes a la potencia térmica disipada mediante intercambiador agua-aceite (PTK), por tratarse del sistema de refrigeración con mayor capacidad de disipación. Como primer paso, es necesario analizar el comportamiento de la potencia disipada en función del incremento en el tamaño del modelo.

$$\bullet \quad E36 \rightarrow E40: \Delta P = 1760 [kW] - 1138 [kW] = + 622 [kW] \quad (201)$$

$$\bullet \quad E40 \rightarrow E46: \Delta P = 2196 [kW] - 1760 [kW] = + 436 [kW] \quad (202)$$

Se ve que el crecimiento no es lineal, pero tampoco se estabiliza: parece un crecimiento potencial moderado. Es decir, el aumento absoluto decrece un poco, pero la tendencia sigue siendo acelerada, y al mismo tiempo los incrementos siguen siendo importantes. Se concluye entonces que la ecuación que representa bastante bien los datos de PTK en función del tamaño E es una curva de tipo potencial:

$$PTK(E) = a * E^b \quad (203)$$

Donde:

- E es el tamaño del reductor (por ejemplo, 20, 23, ..., 65).
- PTK(E) es la potencia térmica disipada en kW.
- a y b son constantes que se obtienen ajustando los datos reales.

Para obtener los datos de a y b se opta por aplicar logaritmo natural (y sus respectivas propiedades) miembro a miembro de la ecuación, llegando a lo siguiente:

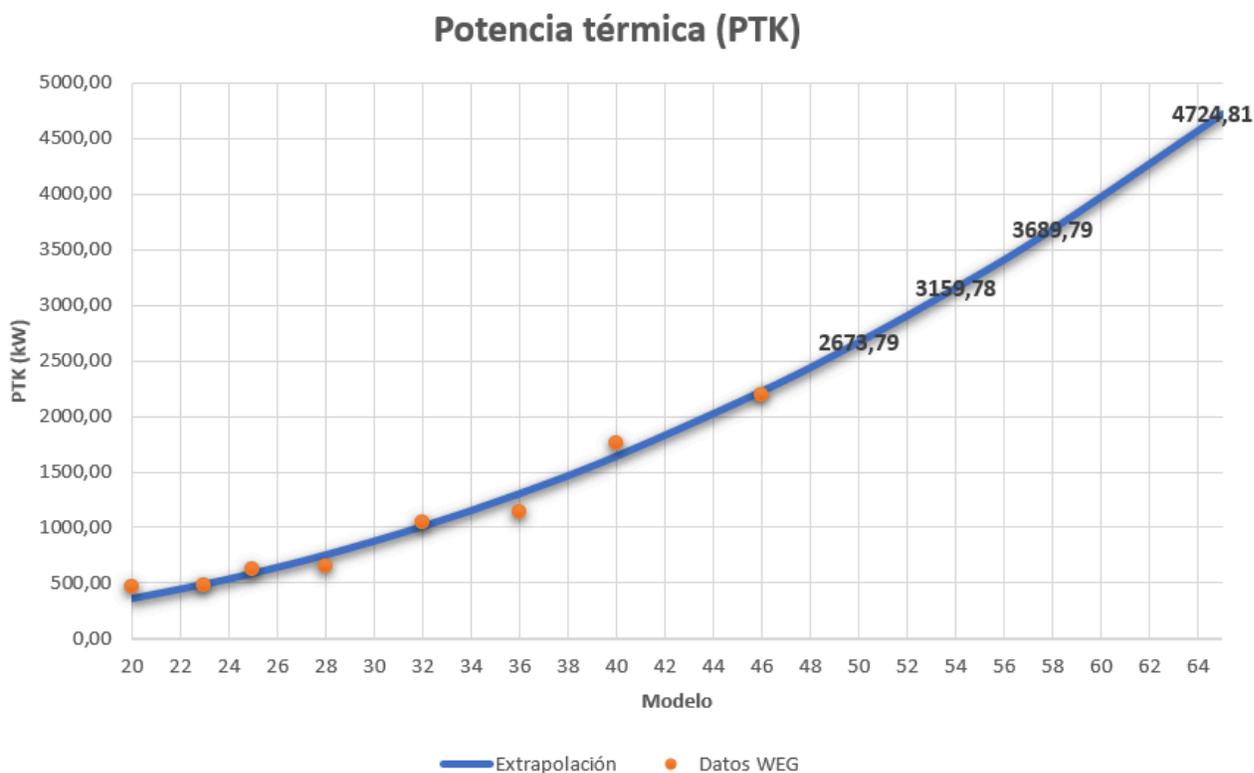
$$\ln [PTK (E)] = \ln (a) + b * \ln(E) \quad (204)$$

Y aplicando un algoritmo de mínimos cuadrados no lineales para encontrar los valores de a y b que mejor ajustan la ecuación a esos puntos, se llega a la siguiente ecuación:

$$PTK (E) = 0,55 * E^{2,17} \quad (205)$$

A partir de esta ecuación se obtiene el siguiente gráfico:

Figura 133



Nota: Potencia térmica disipada mediante intercambiador agua-aceite (PTK) en función del modelo.

Se observa que el modelo se ajusta de muy buena manera a los datos provistos por el catálogo de las cajas Helimax. A partir de esta extrapolación, los datos de la potencia térmica disipada para los modelos que no se encuentran en el catálogo son los siguientes:

Tabla 15

Modelo	PTK [kW]
E50	2673,79
E54	3159,78
E58	3689,79
E65	4724,81

Nota. Datos de potencia térmica disipada para cada modelo.

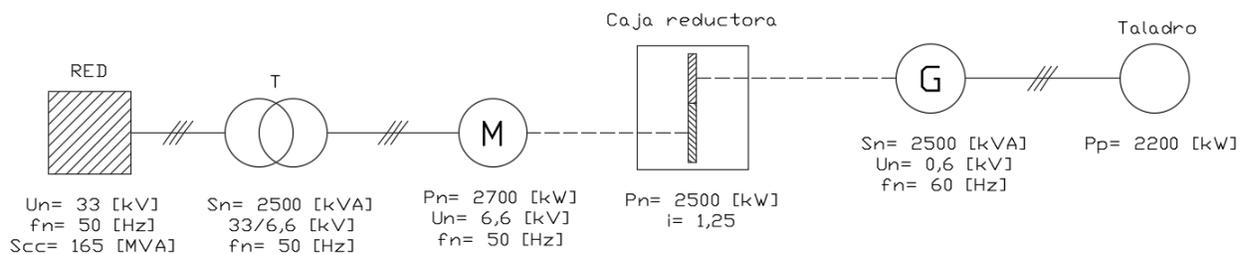
Se verifica que:

$$2673,79 \text{ [kW]} \geq 2323,6 \text{ [kW]} \quad (206)$$

Se concluye que todos estos modelos que se encuentran fuera del catálogo verifican por potencia térmica disipada. Finalmente, se selecciona el modelo **E50**, ya que no tiene sentido sobredimensionar la caja debido a que en el dimensionamiento de la misma ya se tiene en cuenta el factor de servicio. El código del producto, según el fabricante, es: **E50102P190R**.

Esquema unifilar

Figura 134



Nota. Esquema unifilar de la segunda alternativa.

Ventajas y desventajas

Ventajas

- “Alta eficiencia y par: Catálogos de reductoras modulares de alto par (como las Helimax) señalan que ofrecen alta eficiencia, gran capacidad de carga y un par elevado en un diseño compacto.
- Costo inicial relativamente bajo: La caja reductora es un dispositivo mecánico relativamente simple. Su precio es normalmente inferior al de un variador de frecuencia de gran potencia.
- Robustez en ambientes severos: Las cajas reductoras presentan alta resistencia a la fatiga y capacidad para soportar cargas extremas.
- Simplicidad de operación: Una vez ajustada la relación de transmisión, la velocidad de salida depende sólo de la velocidad del motor de entrada. No requiere electrónica de potencia, filtros o sofisticados sistemas de control.”

(NGC, 2019).

Desventajas

- “Necesidad de mantenimiento y lubricación: La lubricación es fundamental para cualquier caja de engranajes, ya que garantiza su funcionamiento estable y continuo. Como parte del mantenimiento regular, se debe revisar si hay fugas de aceite en los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes. Una fuga indica que un sello está defectuoso y debe reemplazarse lo antes posible. Un sello defectuoso puede contaminar la caja de engranajes, permitiendo que entre

polvo, residuos y agua, dañando las piezas y reduciendo la lubricación. Además, se debe limpiar el exterior y revisar corrosión.

- Sobrecarga y desgaste: Engranajes y rodamientos están sujetos a desgaste por carga variable. Se debe vigilar el calentamiento y la contaminación; los fabricantes recomiendan análisis de vibraciones y control del par para evitar fallas.”

(N.d., s.f.).

- “Pérdidas mecánicas y ruido: Aunque eficientes, las reductoras introducen pérdidas por fricción y generan vibración/ruido.
- Riesgo de fallo catastrófico: Un fallo en la reductora puede detener la producción de un pozo de Oil & Gas, causando pérdidas financieras. Una parada inesperada significa interrupciones costosas y su reparación o reemplazo es complejo.”

(Gearbox performance, s.f.).

Comparación con variadores de frecuencia

Las ventajas que presentan los variadores de frecuencia respecto a las cajas reductoras en la industria del *Oil&Gas* se enumeran a continuación:

- “Arranque suave y sin corriente de pico: Los VFD permiten arrancar grandes motores de forma suave, evitando corrientes de arranque que sobrecalientan el motor y el cableado.
- Ajuste continuo de velocidad: la velocidad de salida se controla eléctricamente, evitando el desgaste mecánico que se produce en los componentes que integran la caja.

- Menos mantenimiento: al no existir engranajes, se eliminan fugas de aceite, ruidos y vibraciones asociados a las reductoras. También se reducen los intervalos de mantenimiento y las paradas.
- Factor de potencia mejorado y reducción de la contaminación acústica: el control electrónico puede mejorar el factor de potencia del motor y reducir el ruido y las emisiones.”

(TMEIC Corporation, 2021)

El principal inconveniente de los VFD de alta potencia es el elevado costo inicial. Según los precios declarados por WEG, el VFD MVW 3000 cuesta casi el triple que la caja HELIMAX E50. Esta diferencia debe ponderarse con el hecho de que la caja requiere la utilización de un motor sincrónico, cuya construcción, sistema de excitación y control implican un precio mayor que el de un motor de inducción de la misma potencia; la literatura técnica señala que los motores sincrónicos son “más costosos y complejos” que los motores de inducción y en la práctica se manejan incrementos del 20 % al 40 % sobre el precio del motor asincrónico equivalente, pudiendo ser superiores en unidades de muy alta potencia o con exigencias especiales de velocidad o tensión. Asimismo, debe contemplarse el costo del sistema de arranque del motor sincrónico. Entre las soluciones habituales se encuentran el arranque como motor de inducción mediante un bobinado amortiguador y posterior sincronización, el empleo de un motor auxiliar (“pony motor”) para llevar el conjunto a velocidad, o la utilización de autotransformadores o convertidores de frecuencia para limitar la corriente de arranque. Cada alternativa conlleva una inversión adicional y condiciona la complejidad del sistema.

Por otro lado, el coste operativo de la caja es mayor debido a las necesidades de lubricación, inspección y mantenimiento preventivo: el lubricante debe mantenerse en condiciones adecuadas, se revisan sellos y rodamientos y se realizan análisis de vibraciones

para detectar desgaste prematuro. Aunque estas tareas no exigen necesariamente una parada diaria del equipo, sí implican recursos y paradas programadas que se deben presupuestar.

En síntesis, aunque la inversión inicial en un variador de frecuencia sea más elevada que la de una caja reductora, la diferencia se atenúa al considerar el precio del motor sincrónico y del sistema de arranque. Asimismo, los ahorros relacionados a la reducción de mantenimiento mecánico pueden compensar el coste inicial a lo largo de la vida útil del equipo.

En el sector del *Oil & Gas*, la estrategia de selección de equipos está fuertemente condicionada por el requerimiento de continuidad operativa: cada parada no programada repercute de forma directa en la productividad de la instalación y, por ende, en sus resultados económicos. Las publicaciones técnicas subrayan que las cajas reductoras de alta velocidad son componentes críticos cuyos fallos pueden originar paradas catastróficas y elevados tiempos de reparación. De ahí que, más allá del costo, la fiabilidad y la disponibilidad de los sistemas constituyen criterios prioritarios.

En aplicaciones de larga duración, como la perforación de un pozo, que pueden extenderse durante varias semanas sin interrupciones, se prioriza el uso de soluciones que minimicen los puntos de fallo. El variador de frecuencia suprime elementos mecánicos como engranajes y rodamientos, reduciendo así el riesgo inherente a estos componentes y permitiendo arranques y paradas suaves con menos sollicitación mecánica.

En conclusión, la utilización de una caja reductora, si bien representa una alternativa técnicamente viable y con aspectos de interés, es considerada menos conveniente frente a la Alternativa 1 y, por lo tanto, **queda descartada**.

Alternativa 3

Una tercera alternativa consiste en utilizar un convertidor de frecuencia para alimentar el taladro. Aunque en el ámbito práctico suele emplearse indistintamente la denominación

"convertidor de frecuencia" o "variador de frecuencia", es importante señalar que no se trata del mismo dispositivo. Si bien ambos presentan similitudes en su estructura electrónica, sus funciones y aplicaciones son distintas. Para comprender con mayor precisión estas diferencias, a continuación se presenta una breve comparación entre ambos sistemas.

“Un convertidor de frecuencia transforma la energía de corriente alterna (CA) en una onda sinusoidal pura mediante el proceso de CA→CC→CA. La frecuencia y el voltaje de salida pueden ajustarse dentro de un cierto rango. Es diferente del variador de frecuencia (VFD) utilizado para la regulación de velocidad de motores, y también distinto de la fuente de alimentación de CA común. Una fuente de alimentación de CA ideal se caracteriza por una frecuencia y voltaje estables, resistencia interna cero y una forma de onda de voltaje sinusoidal pura (sin distorsión). El convertidor de frecuencia se aproxima bastante a esta fuente de alimentación ideal.

Por otro lado, un VFD está compuesto por circuitos de CA-CC-CA (modulación de onda), y debería denominarse, según el estándar, controlador de velocidad de frecuencia variable. La forma de onda de su voltaje de salida es una onda cuadrada de pulsos con muchos componentes armónicos. El voltaje y la frecuencia cambian proporcionalmente al mismo tiempo y no pueden ajustarse por separado, lo que no cumple con los requisitos de una fuente de alimentación de CA. En principio, no puede usarse como fuente de alimentación, y generalmente se utiliza para la regulación de velocidad de motores asíncronos trifásicos.

En conclusión, el convertidor de frecuencia puede proporcionar el voltaje y la frecuencia de la red eléctrica de cualquier país, también puede aplicarse a cargas con diversas características de impedancia, incluyendo resistividad, capacitancia, inductancia y otras cargas no lineales, estando bastante cerca de la fuente de alimentación de CA ideal.” (*Frequency Converter vs. Variable Frequency Drive*, s.f.).

Dimensionamiento de los equipos

Convertidor de frecuencia (Static Frequency Converter - SFC)

Para este caso, se requiere convertir la frecuencia de 50 a 60 [Hz]. Como se mostró previamente, el taladro representa una carga sumamente variable, con picos de potencia que alcanzan los 2200 [kW], por lo que el convertidor debe tener la capacidad de manejar dicha potencia.

En aplicaciones de alta potencia, es común que los sistemas basados en convertidores de frecuencia estén conformados por múltiples convertidores de frecuencia estáticos conectados en paralelo. Esta configuración permite cumplir con los exigentes requerimientos energéticos del sistema, además de ofrecer redundancia operativa. De este modo, se garantiza la continuidad del suministro eléctrico en aplicaciones críticas, incluso ante fallos parciales en alguno de los convertidores. Las potencias estándares de los convertidores de frecuencia son las siguientes: 200 [kVA], 250 [kVA], 300 [kVA], 500 [kVA], 800 [kVA], 1000 [kVA].

La selección de un convertidor de frecuencia es un proceso complejo que requiere tanto información técnica precisa como experiencia en la materia. Para una elección adecuada del equipo, es imprescindible contar con una serie de datos clave, tales como: tensión y frecuencia de entrada, tensión y frecuencia de salida, características eléctricas y tipo de carga, potencia máxima demandada, condiciones ambientales (como temperatura de operación), si la instalación será en interiores o exteriores, y el campo de aplicación específico.

Dada la sensibilidad de estos parámetros y su impacto en el desempeño del sistema, lo más recomendable es contactar directamente al fabricante. Al proporcionar toda la información relevante, el fabricante —con base en su experiencia y conocimientos técnicos— podrá ofrecer la solución más adecuada para las condiciones particulares del proyecto.

Germarel GmbH, con sede en Alemania, es una empresa especializada en el diseño y fabricación de convertidores de frecuencia estáticos (SFC) de alta calidad para aplicaciones industriales, marítimas y de infraestructura crítica. Su enfoque tecnológico está orientado a la conversión de energía entre diferentes estándares de red eléctrica —principalmente 50 [Hz], 60 [Hz] y 400[Hz] — garantizando una salida de onda sinusoidal pura, tensión estable y baja distorsión armónica. La empresa ofrece soluciones modulares desde 10 [kVA] hasta 4 [MVA], con posibilidad de conexión en paralelo para satisfacer demandas de alta potencia. Sus convertidores están diseñados para operar bajo condiciones exigentes, adaptándose a distintas configuraciones de red y cargas complejas (inductivas, capacitivas o no lineales). Germarel integra tecnologías basadas en IGBT y control digital avanzado, asegurando precisión en la regulación de frecuencia y confiabilidad operativa. Todos sus equipos cumplen con estándares internacionales de calidad y seguridad eléctrica, como IEC, IEEE y UL. Gracias a su experiencia técnica, enfoque personalizado y compromiso con la excelencia, Germarel se ha posicionado como un referente en el mercado de conversión de frecuencia, aportando soluciones robustas y adaptables a las necesidades más exigentes de la industria.

Los datos provistos para la selección del convertidor fueron los siguientes:

- Tensión de entrada: 380 [V]
- Frecuencia de entrada: 50 [Hz]
- Tensión de salida: 480 [V] (El fabricante no ofrece la opción de 600 [V])
- Frecuencia de salida: 60 [Hz]
- Potencia máxima de la carga: 2200 [kW]
- Tipo de carga: Variable - Motores con variadores de frecuencia
- Locación: Onshore - Outdoor
- Temperatura ambiente: 0-40 [°C]
- Aplicación: En yacimiento petrolífero, para alimentación de equipo de perforación

La solución propuesta por Germarel fue la siguiente: colocar cuatro convertidores de 800 [kVA] en paralelo para alcanzar la potencia requerida, es decir, 3200 [kVA]. El factor de potencia de salida es de 0,9, por lo que la potencia activa que suministra el convertidor es:

$$P [kW] = 3200 [kVA] * 0,9 = 2880 [kW]$$

El paquete, además de los cuatro convertidores, incluye los siguientes elementos:

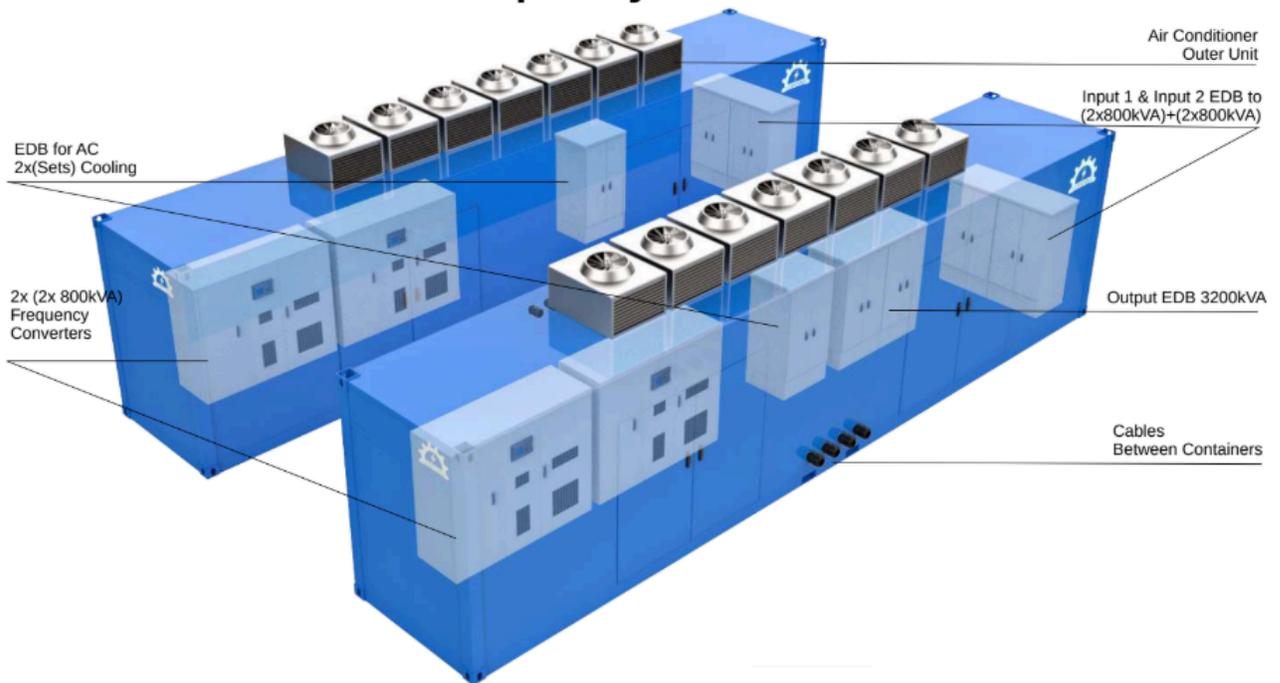
- Transformador 3000 [kVA] conexión delta-estrella (El convertidor de salida funciona con conexión en estrella con neutro)
- Cable entre convertidor de frecuencia y transformador
- Paneles de distribución eléctrica para conexión en paralelo
- Paneles de distribución eléctrica para salida
- Tres contenedores de 40 pies (12 metros aproximadamente)

Como la aplicación es *outdoor*, los elementos deben ir dentro de contenedores. A continuación se observa un esquema del paquete completo:

Aclaración: EDB significa Electrical Distribution Board, es decir, tablero de distribución eléctrica.

Figura 135

3200kVA – 2880kW (2 x {2x800kVA}) Frequency Converter IP65



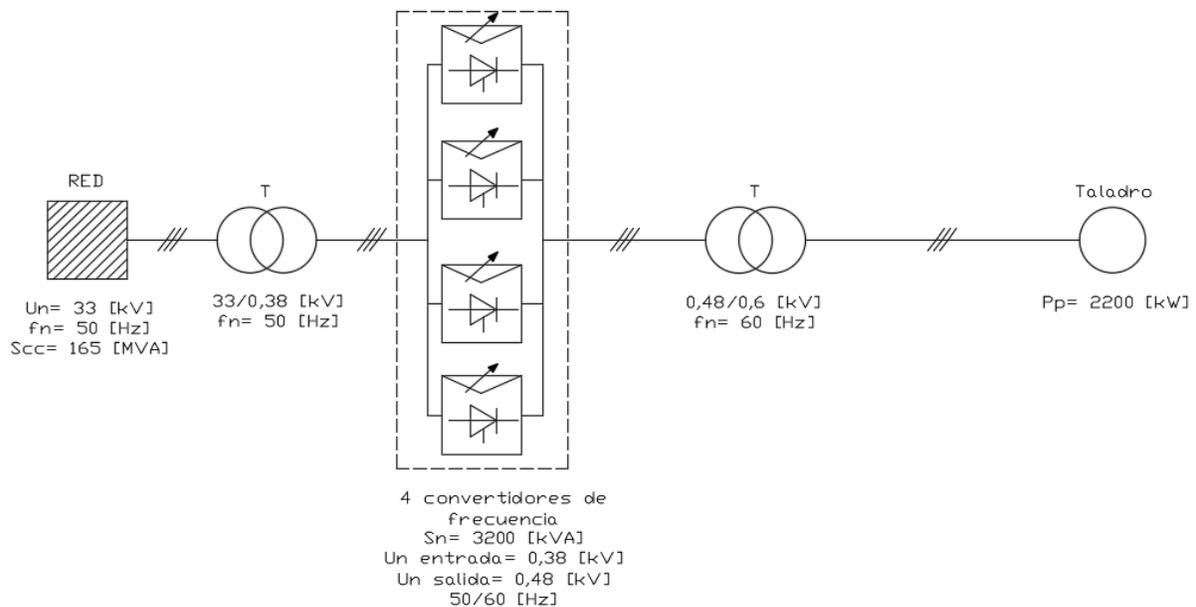
Nota: Convertidor de frecuencia 3200 [kVA].

Se necesitan tres autotransformadores (uno por fase) a la salida del convertidor para elevar la tensión de 480 [V] a los 600 [V] que requiere el taladro.

Esquema unifilar

Luego, se adjunta la figura del esquema unifilar de la solución propuesta para este caso:

Figura 136



Nota: Esquema unifilar de la tercera alternativa.

Ventajas y desventajas

La principal ventaja de esta configuración es la simplificación del sistema. En lugar de emplear un conjunto compuesto por VFD, motor y alternador, se utiliza un único convertidor de frecuencia integrado, lo que facilita significativamente la instalación, las conexiones y las tareas de mantenimiento.

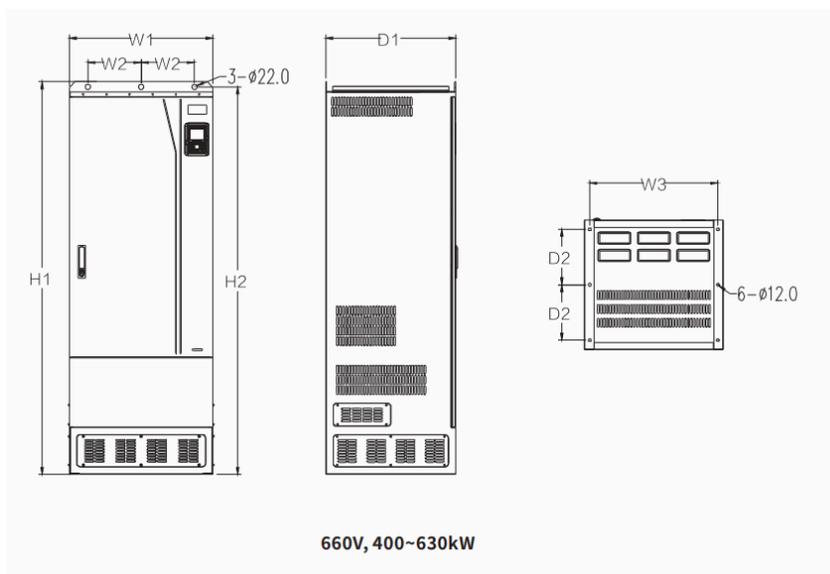
No obstante, esta solución presenta dos desventajas importantes:

1. Cantidad de contenedores: Esta alternativa requiere tres contenedores, lo que implica la utilización de igual número de tráilers para su transporte. Esto incrementa considerablemente el volumen del grupo generador (*genset*), y con ello, la complejidad logística y operativa en campo.

2. Costo: El convertidor, por sí solo, tiene un valor superior al de las otras dos alternativas consideradas. Además, debe contemplarse el costo adicional de los transformadores y de los dos tráilers extra necesarios para el transporte.

Dado el elevado costo del convertidor de frecuencia inicialmente considerado, se evaluó la posibilidad de incorporar una alternativa proveniente del mercado chino, caracterizado por ofrecer precios significativamente más bajos. Esta diferencia se explica, en gran medida, por factores como menores costos de mano de obra y de insumos, producción a gran escala y normativas de fabricación menos exigentes. En este contexto, se estableció contacto con el proveedor Greencisco Industrial Co., reconocido como uno de los principales fabricantes e integradores internacionales de equipos de suministro de energía en China. La propuesta presentada consistió en la provisión de un VFD modelo FCD2-2-3780KW, diseñado para aplicaciones en exteriores, con gabinete IP55 y sistema de climatización incorporado. El conjunto está conformado por seis VFD de 630 [kW] conectados en paralelo, incluye un transformador de aislamiento de entrada, un interruptor de 5000 [A] y seis reactores de corriente continua.

Figura 137



Nota: Esquema VFD 630 [kW].

Las características de entrada y salida son las siguientes:

- Entrada: 380 [VAC], trifásica, 50 [Hz].
- Salida: 600 [VAC], trifásica, 60 [Hz], 4080 [A].

El precio final de esta solución representa aproximadamente una décima parte de la oferta de Germarel, lo que, en principio, la convierte en la alternativa más ventajosa desde el punto de vista económico. No obstante, hay una gran desventaja en esta alternativa.

Si bien los productos de origen chino se presentan como una alternativa atractiva desde el punto de vista económico, en la industria del petróleo y gas persiste una marcada reticencia a su adopción. Este sector se caracteriza por un enfoque conservador, no como una mera resistencia al cambio, sino como una estrategia necesaria para minimizar riesgos: un error en la selección de equipos o materiales puede derivar en consecuencias económicas de gran magnitud, además de potenciales impactos en seguridad y medioambiente. En este contexto, las empresas operadoras priorizan la utilización de componentes de calidad comprobada y con certificaciones internacionales reconocidas, aun cuando ello implique mayores costos, antes

que optar por soluciones más económicas cuya confiabilidad y desempeño a largo plazo no han sido suficientemente validados.

En términos generales, parte de esta desconfianza se sustenta en la percepción de que algunos fabricantes chinos operan bajo normativas de producción menos rigurosas y con un enfoque orientado principalmente a la competitividad en precios y volúmenes. Esta circunstancia resulta poco compatible con las exigencias de las compañías líderes del sector, que requieren trazabilidad completa, cumplimiento estricto de normas internacionales y un historial probado de confiabilidad en campo.

En conclusión, si bien la opción de recurrir a proveedores chinos ofrece ventajas económicas innegables, la percepción de riesgo y la falta de confianza aún vigentes en el sector petrolero limitan de manera significativa la probabilidad de que esta alternativa sea adoptada en el corto plazo.

Por las distintas razones previamente desarrolladas, esta opción se considera inviable y queda descartada.

Análisis ambiental

“Los gases de efecto invernadero actúan como una manta que cubre la tierra y evita que el calor escape de la atmósfera. Cada gas de efecto invernadero tiene un efecto diferente sobre el calentamiento global dependiendo de su capacidad para absorber energía (eficiencia radiactiva) y cuánto tiempo permanecerá en la atmósfera (también conocido como su vida útil).

El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha desarrollado una unidad de medida común para comparar fácilmente los impactos de diferentes gases. Se conoce como Potencial de Calentamiento Global (GWP). GWP es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de una tonelada de gas durante un período determinado, en relación con el dióxido de carbono. Cuanto mayor es el GWP, más calienta la tierra el gas en comparación con

el dióxido de carbono durante ese período. El período de tiempo estándar utilizado para GWP es de 100 años. La Figura 138 a continuación muestra diferentes valores de GWP para varios gases en comparación con el dióxido de carbono:

Figura 138

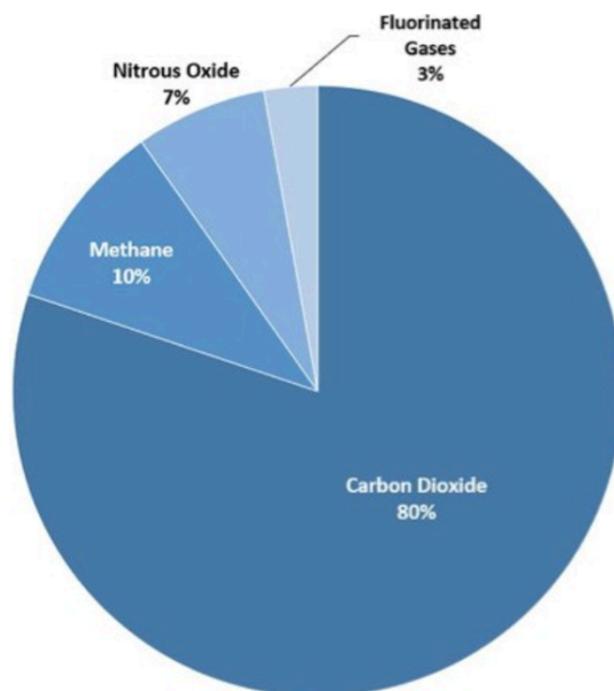
Industrial designation or common name	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
Carbon dioxide	CO ₂	1	1	1
Methane	CH ₄	21	25	28
Nitrous oxide	N ₂ O	310	298	265
Substances controlled by the Montreal Protocol				
CFC-11	CCl ₃ F	3,800	4,750	4,660
CFC-12	CCl ₂ F ₂	8,100	10,900	10,200
CFC-13	CClF ₃		14,400	13,900
CFC-113	CCl ₂ CClF ₂	4,800	6,130	5,820
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂		10,000	8,590
CFC-115	CClF ₂ CF ₃		7,370	7,670
Halon-1301	CBrF ₃	5,400	7,140	6,290
Halon-1211	CBrClF ₂		1,890	1,750
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂		1,640	1,470
Carbon tetrachloride	CCl ₄	1,400	1,400	1,730
Methyl bromide	CH ₃ Br		5	2
Methyl chloroform	CH ₃ CCl ₃	100	146	160

Nota: Valores potenciales de calentamiento global.

Cuatro gases diferentes se clasifican como gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y gases fluorados. El dióxido de carbono es el mayor gas de efecto invernadero por volumen en la atmósfera. Las emisiones de CO₂ se producen por la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos y materiales biológicos. El dióxido de carbono recibe la mayor parte de la atención, pero no es el gas de efecto invernadero más potente. Las emisiones de metano provienen predominantemente de la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo. El metano

también puede liberarse a la atmósfera por otros medios, como la ganadería, otras prácticas agrícolas y la descomposición de los desechos orgánicos. La emisión de óxido nitroso es el resultado de la agricultura y el uso de la tierra, las actividades industriales, la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos, así como durante el tratamiento de aguas residuales. Los gases fluorados se clasifican como hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y trifluoruro de nitrógeno. Si bien normalmente se emiten en pequeñas porciones, los gases fluorados son los gases de efecto invernadero más poderosos que se emiten a partir de una serie de prácticas industriales y tienen un alto GWP. La Figura 139 a continuación muestra la distribución de los gases de efecto invernadero.

Figura 139



Nota: Distribución de los gases de efecto invernadero.

Los gases fluorados no se emiten en el proceso de fracturación hidráulica. El metano es el gas más relevante emitido por la producción de petróleo y gas y tiene un GWP de 28, lo que

significa que 1 tonelada de metano emitido equivale a 28 toneladas de CO₂ emitido. De la Figura 138 y de los valores del AR5, se observa que el N₂O tiene un GWP mucho más alto, de 265. Usando estos números, se puede derivar la ecuación X que da CO₂e, donde la "e" significa equivalente:

$$CO_2e = CO_2(ton) + 28 * CH_4(ton) + 265 * N_2O(ton) \quad (207)$$

Hay tres gases más emitidos por el proceso de fracturación hidráulica que regula la EPA (Environmental Protection Agency); monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PM).

El CO es el más conocido de los tres. Es un gas incoloro e inodoro que se libera como producto de la combustión. A escala mundial, el monóxido de carbono no tiene un impacto grave, pero en la fuente de emisiones, puede reaccionar con otros contaminantes atmosféricos para formar ozono troposférico (O₃). El monóxido de carbono también es un componente esencial en el smog. El *smog*, o niebla de humo, es un tipo de contaminación atmosférica intensa. El término "smog" se acuñó a principios del siglo XX y es una combinación de las palabras "smoke" (humo) y "fog" (niebla) para referirse a la niebla de humo debido a su opacidad y olor. Al aire libre, esto puede ser dañino cerca y puede aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias como el asma. Las personas que tienen algunos tipos de enfermedades cardíacas pueden ser más susceptibles a los efectos del monóxido de carbono.

El NO_x incluye seis compuestos químicos diferentes con diferentes pesos moleculares. Algunos de los compuestos clasificados como óxidos de nitrógeno incluyen dióxido de nitrógeno, ácido nitroso y ácido nítrico. Estos productos químicos reaccionan con los compuestos orgánicos del aire y crean ozono, un ingrediente principal del smog. En altas concentraciones, el NO_x puede afectar al sistema respiratorio y puede agravar múltiples

enfermedades respiratorias como el asma. También puede provocar otros síntomas respiratorios, como tos, dificultad para respirar y sibilancias. La formación de NOx se produce por tres mecanismos durante la combustión, NOx térmico, rápido y combustible. Las emisiones de NOx provienen predominantemente del térmico, siendo las emisiones rápidas y de combustible insignificantes. La mayor parte del NOx térmico se forma en las bolsas de alta temperatura de la cámara de combustión cuando el nitrógeno y el oxígeno reaccionan.

Las PM están compuestas por partículas sólidas finas (suciedad, polvo u hollín) y gotas líquidas en el aire. Estas partículas vienen en muchos tamaños y formas y pueden estar formadas por docenas de productos químicos diferentes. Si se inhala, las partículas pueden dañar los sistemas respiratorio y pulmonar. Algunas partículas, de diez micrómetros o más pequeñas, pueden penetrar profundamente en los pulmones e incluso en el torrente sanguíneo. PM también juega un papel importante en la creación de smog.

La industria del petróleo y el gas es una fuente líder de metano y otras emisiones nocivas en Argentina (y en el resto del mundo). Las restricciones y regulaciones del gobierno han tenido como objetivo reducir estas emisiones durante años mediante la creación de leyes y la implementación de estándares de emisiones. También hay grupos globales que crean pautas para que los países las sigan. El más notable en la historia reciente es el Acuerdo de París. El Acuerdo de París es un tratado internacional legalmente vinculante sobre el cambio climático que fue adoptado por 196 países, incluido Argentina, el 12 de diciembre de 2015. El objetivo de este acuerdo es limitar el calentamiento global muy por debajo de los 2 [°C], pero preferiblemente más cerca de los 1,5 [°C], en comparación con los niveles preindustriales. El acuerdo funciona en un ciclo de cinco años, el de una acción climática cada vez más ambiciosa. El Acuerdo de París permite a los países compartir sus soluciones a corto y largo plazo para la mitigación del cambio climático, fomentando así la investigación y ayudando al mundo a alcanzar el objetivo del Acuerdo de París. El acuerdo también ayuda a otros países

dentro del grupo que necesitan apoyo con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, proporcionando recursos financieros, tecnológicos y de desarrollo de capacidades

Con restricciones y regulaciones provenientes de un nivel global y nacional y cada vez más estrictas cada año, es importante que la fracturación hidráulica y el campo del petróleo y el gas en general conozcan estas reglas y las cumplan, y continúen haciendo mejoras, si la industria quiere continuar en el futuro”.(*Analysis of Emissions Profiles of Hydraulic Fracturing Engine Technologies*, 2022, p.27).

Comparación emisiones

Como se mencionó previamente, los gases de efecto invernadero generados en la industria del petróleo son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). En conjunto, estos se expresan en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), lo que permite realizar comparaciones homogéneas de emisiones. De este modo, para contrastar el impacto ambiental de los motores diésel frente a la generación eléctrica proveniente de la red en Argentina, es necesario analizar sus emisiones en términos de CO₂e.

En primer lugar, se examinan las emisiones de los motores diésel actualmente en operación en distintos yacimientos. De acuerdo con información provista por las empresas que operan en Vaca Muerta, el consumo de combustible asociado a la operación de un taladro asciende a aproximadamente 6.000 litros de diésel por día. Según los factores de emisión reportados por ClimaTiq, una organización europea que centraliza datos oficiales de emisiones y los disponibiliza mediante una base global y una API para cálculos de huella de carbono, cada litro de diésel consumido produce 2,706 [kg] de CO₂e.

Por lo tanto:

$$\text{Emisiones motores diésel por día} = 6000 \left[\frac{l}{\text{día}} \right] * 2,706 \left[\frac{kg \text{ CO}_2e}{l} \right] \quad (208)$$

$$\text{Emisiones motores diésel por día} = 16236 \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{día}} \right] \quad (209)$$

En consecuencia, la operación con motores diésel genera alrededor de 16.236 [kg] de CO₂e diarios. Considerando una operación de 300 días al año, el total anual de emisiones resulta:

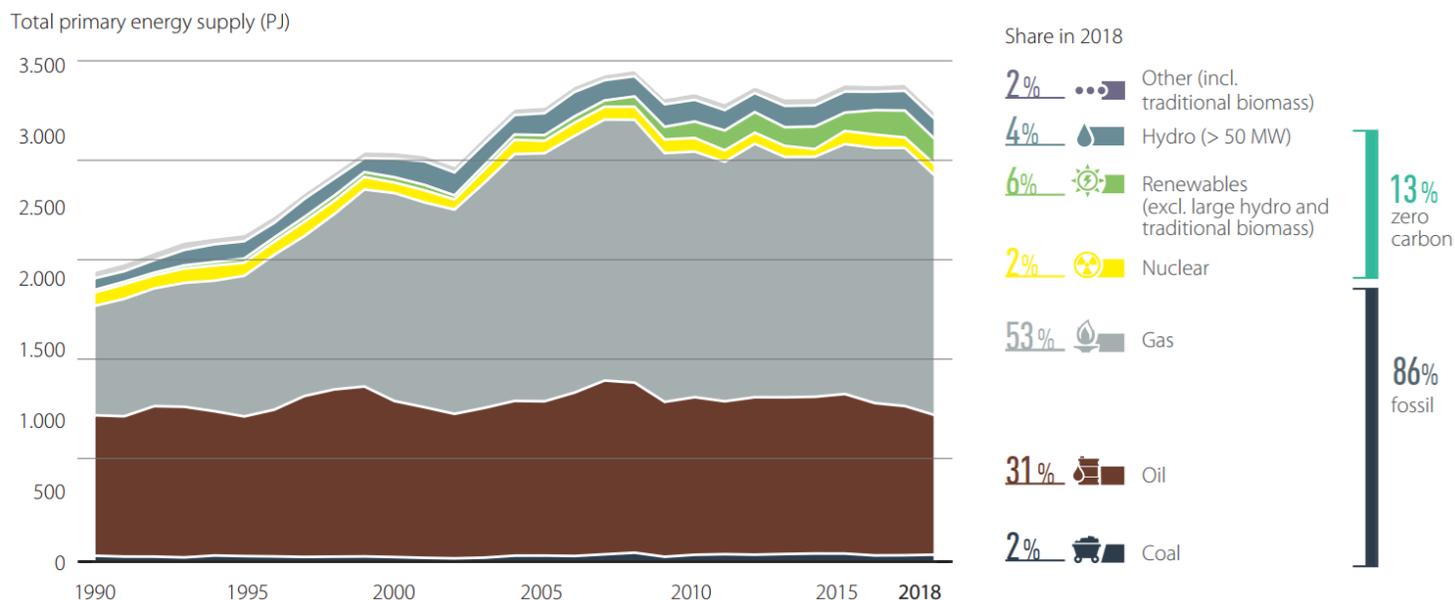
$$\text{Emisiones motores diésel por año} = 16236 \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{día}} \right] * 300 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \quad (210)$$

$$\text{Emisiones motores diésel por año} = 4870800 \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{año}} \right] \simeq 4871 \left[\frac{\text{ton CO}_2\text{e}}{\text{año}} \right] \quad (211)$$

Finalmente, a partir de los motores diésel, se emiten 4.871 toneladas de CO₂e por año durante la perforación de pozos petroleros en Argentina.

Para analizar las emisiones producidas por la red eléctrica en Argentina, primero se debe entender como está compuesta la misma. “Los combustibles fósiles representan el 86% de la matriz energética primaria de Argentina (incluyendo electricidad, calor, combustibles para transporte, etc.). Las energías renovables avanzan lentamente, mientras que el uso de gas ha aumentado de manera considerable. Argentina necesita revertir esta tendencia si pretende alinearse con una trayectoria compatible con el objetivo de 1,5 °C. A nivel global, la participación de los combustibles fósiles en la energía primaria total debe reducirse al 67% para 2030, al 33% para 2050, y a niveles sustancialmente inferiores en ausencia de tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS).” (Climate Transparency, 2019). El siguiente gráfico fue realizado mediante datos provistos por CAMMESA en 2019:

Figura 140

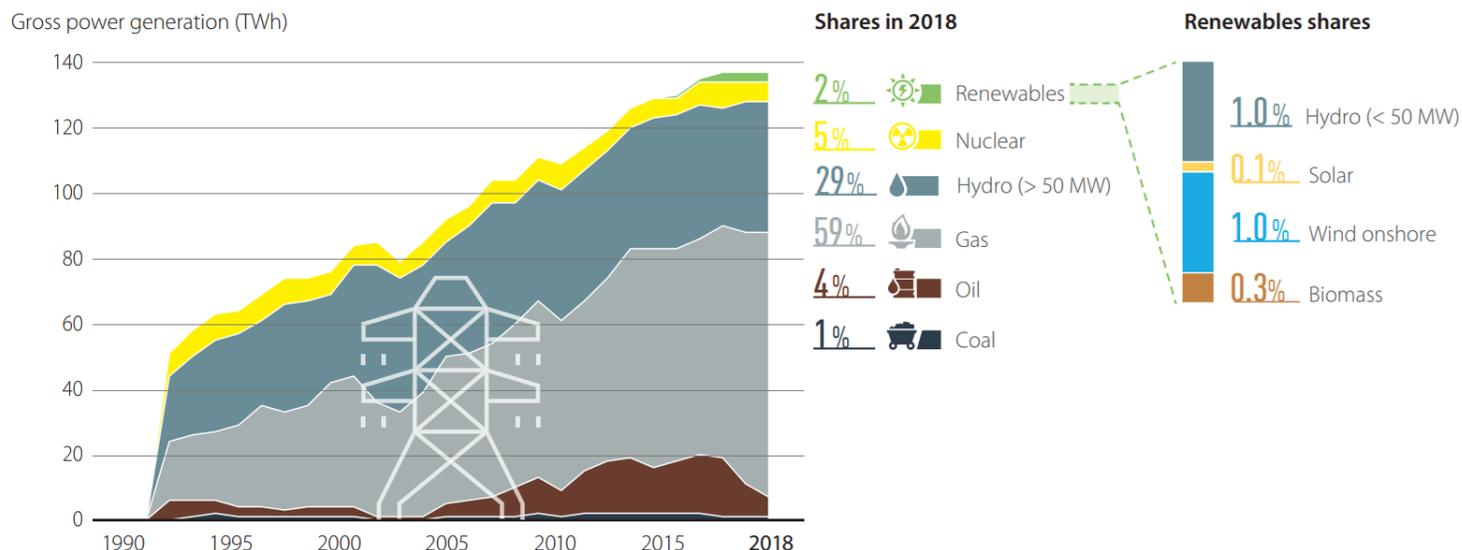


Nota: Matriz energética de Argentina.

“Este gráfico muestra la combinación de combustibles utilizada para el suministro energético total, incluyendo la energía destinada a generación eléctrica, calefacción, cocina y combustibles para el transporte. En Argentina, el uso de petróleo y gas es cada vez mayor. En conjunto, los combustibles fósiles representan casi el 86% de la matriz energética, un valor cercano al promedio del G20.

El gas y las grandes centrales hidroeléctricas son las principales fuentes de generación eléctrica en Argentina. Para mantenerse dentro del límite de 1,5 °C, el país necesita eliminar progresivamente el gas, el petróleo y el carbón de su matriz eléctrica, y acelerar la incorporación de energías renovables. En 2018, el 2,4% de la electricidad de Argentina provino de fuentes renovables, incluyendo solar, eólica, bioenergía e hidroeléctrica de pequeña escala (menos de 50 MW). El gas sigue siendo la mayor fuente de energía para la producción eléctrica, con un 59%, mientras que la gran hidroelectricidad aportó un 29%. Nuevamente, el siguiente gráfico fue realizado a partir de datos provistos por CAMMESA en 2019:

Figura 141



Nota: Fuentes de generación eléctrica en Argentina.

Por cada kilowatt-hora de electricidad, se emiten 313 g de CO₂e en Argentina. Este valor se encuentra por debajo del promedio del G20 (458 g CO₂e/kWh), pero sigue siendo elevado en comparación con los países líderes del G20. La intensidad de emisiones ha disminuido ligeramente menos (-10%, 2013-2018) que el promedio del G20 (-11%).”(Climate Transparency, 2019) En conclusión, se emiten 0,313 [kg] de CO₂e por kilowatt-hora producido en Argentina.

A partir de los cálculos realizados en la sección *Análisis de la carga*, se determinó que se consumirían 15.333,75 kilowatt-hora por día para alimentar al taladro. Entonces:

$$\text{Emisiones red eléctrica por día} = 15333,75 \left[\frac{\text{kW-h}}{\text{día}} \right] * 0,313 \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kW-h}} \right] \quad (212)$$

$$\text{Emisiones red eléctrica por día} \approx 4800 \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kW-h}} \right] \quad (213)$$

En consecuencia, la operación a partir de la red eléctrica genera alrededor de 4800 [kg] de CO₂e diarios. Nuevamente, considerando una operación de 300 días al año, el total anual de emisiones resultaría:

$$Emisiones\ red\ eléctrica\ por\ año = 4800 \left[\frac{kg\ CO_2e}{día} \right] * 300 \left[\frac{días}{año} \right] \quad (214)$$

$$Emisiones\ red\ eléctrica\ por\ año = 1440000 \left[\frac{kg\ CO_2e}{año} \right] \simeq 1440 \left[\frac{ton\ CO_2e}{año} \right] \quad (215)$$

Utilizando energía proveniente de la red eléctrica, se emitirían 1440 toneladas de CO₂e por año durante la perforación de pozos petroleros.

Realizando la comparación de emisiones de CO₂ equivalente:

$$\frac{Emisiones\ red\ eléctrica\ por\ año}{Emisiones\ motores\ diésel\ por\ año} = \frac{1440 \left[\frac{ton\ CO_2e}{año} \right]}{4871 \left[\frac{ton\ CO_2e}{año} \right]} * 100\% \simeq 30\% \quad (216)$$

A partir del análisis realizado, se concluye que la sustitución de la generación eléctrica actualmente provista por los motores diésel en operación en Vaca Muerta por electricidad suministrada desde la red de media tensión de Neuquén permitiría una reducción del 70% en las emisiones de gases de efecto invernadero. Este cambio representaría un avance significativo para Argentina en el cumplimiento de los compromisos establecidos en la Agenda 2030, reafirmando la importancia de adoptar soluciones energéticas más sostenibles y alineadas con los objetivos de mitigación climática del país.

Análisis económico

Además de llevar a cabo el análisis ambiental, resulta imprescindible realizar un análisis económico, ya que, aunque la reducción del impacto ambiental constituye un objetivo prioritario, la viabilidad y la toma de decisiones en la industria del *Oil & Gas* —al igual que en otros sectores industriales— están fuertemente condicionadas por los factores económicos. Este enfoque integrado permite evaluar no solo los beneficios ambientales de la transición energética, sino también su sostenibilidad financiera, facilitando decisiones estratégicas que armonicen eficiencia, rentabilidad y responsabilidad ambiental.

Comparación costos de operación

Como se mencionó previamente, para alimentar al taladro se consumen aproximadamente 6000 litros de diésel por día. Hoy en día, el precio del diesel en Argentina para las empresas operadoras es de 1,23 U\$D por litro. Entonces:

$$\text{Costo diésel por día} = 6000 \left[\frac{l}{\text{día}} \right] * 1,23 \left[\frac{U\$D}{l} \right] \quad (217)$$

$$\text{Costo diésel por día} = 7380 \left[\frac{U\$D}{\text{día}} \right] \quad (218)$$

Actualmente, la operación del taladro cuesta 7.380 [U\$D] por día. Considerando una operación de 300 días al año, el costo anual de operación resulta:

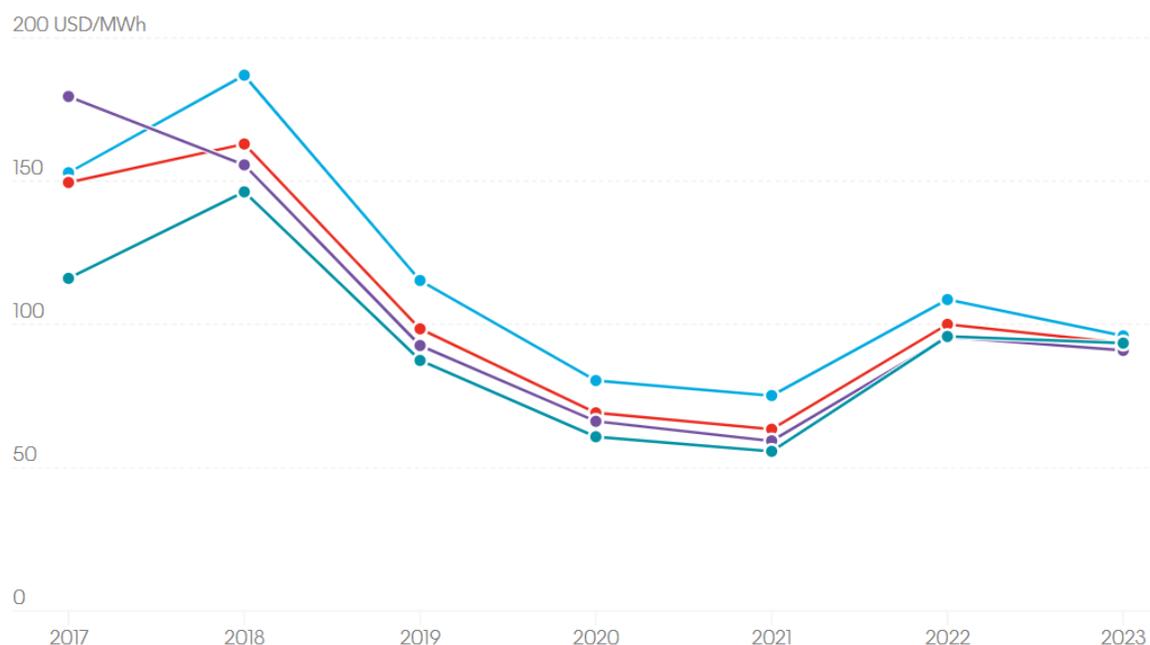
$$\text{Costo diésel por año} = 7380 \left[\frac{U\$D}{\text{día}} \right] * 300 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \quad (219)$$

$$\text{Costo diésel por año} = 2214000 \left[\frac{U\$D}{\text{año}} \right] = 2,214 \left[\frac{MU\$D}{\text{año}} \right] \quad (220)$$

Finalmente, operar el taladro a partir de los motores diésel cuesta aproximadamente 2,214 millones de dólares por año.

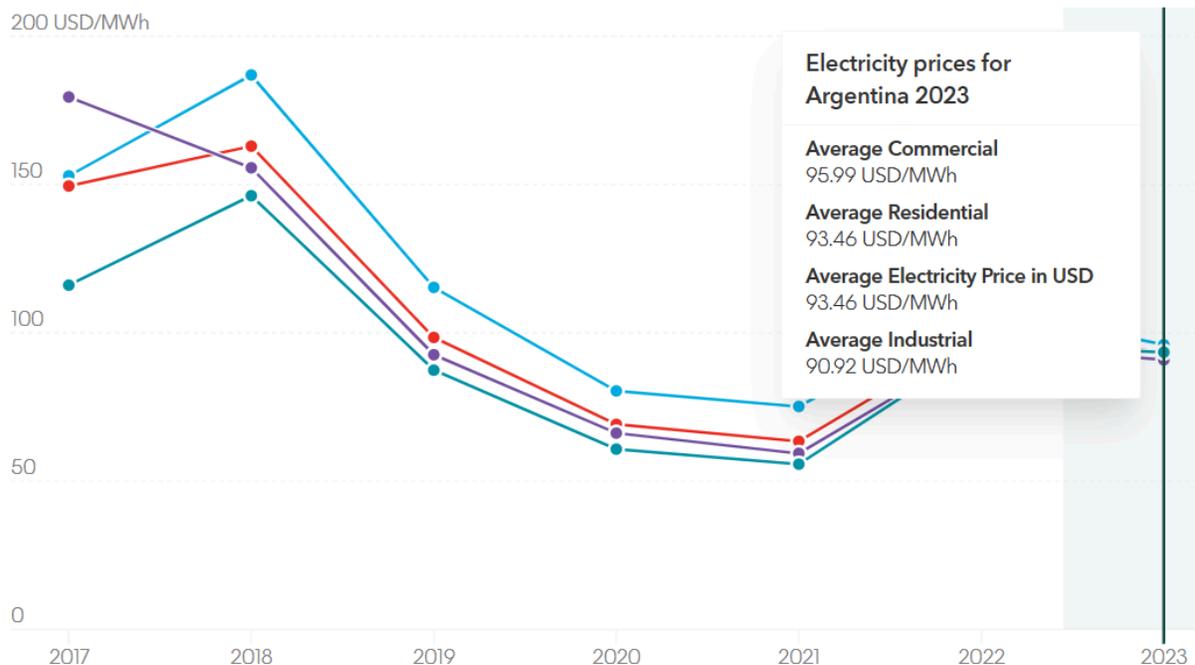
En lo que respecta al precio de la energía eléctrica suministrada por la red, resulta más difícil establecer un valor unitario único. El precio promedio de la electricidad en Argentina ha disminuido de 100,02 USD/MWh en 2022 a 93,46 USD/MWh en 2023. Desde 2017, el precio promedio de la electricidad en el país ha fluctuado entre 63,41 USD/MWh (2021) y 162,97 USD/MWh (2018).

Figura 142



Nota: Variación del precio de la energía eléctrica en Argentina.

Figura 143



Nota: Precios promedio de la energía eléctrica en Argentina en 2023.

(Argentina - Climatescope 2024, 2024).

De acuerdo con el informe publicado por *ClimateScope*, el precio promedio de la energía eléctrica para el sector industrial en Argentina es de 90,92 USD por [MWh]. Si bien este valor no puede considerarse exacto, dado que el precio de la electricidad varía según diversos factores, como la región o el tipo de usuario, resulta útil como referencia preliminar para realizar un análisis inicial y establecer una comparación rápida con el costo del diésel. Como se mencionó previamente, se necesitan 15.333,75 kilowatt-hora (15,34 [MWh]) por día para alimentar al taladro. Entonces:

$$\text{Costo energía eléctrica por día} = 15,34 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{día}} \right] * 90,92 \left[\frac{\text{USD}}{\text{MWh}} \right] \quad (221)$$

$$\text{Costo energía eléctrica por día} = 1395 \left[\frac{\text{U\$D}}{\text{día}} \right] \quad (222)$$

En consecuencia, la operación a partir de la red eléctrica costaría alrededor de 1395 U\\$D diarios. Nuevamente, considerando una operación de 300 días al año, el costo anual de operación resultaría:

$$\text{Costo energía eléctrica por año} = 1395 \left[\frac{\text{U\$D}}{\text{día}} \right] * 300 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \quad (223)$$

$$\text{Costo energía eléctrica por año} = 418500 \left[\frac{\text{U\$D}}{\text{año}} \right] = 0,4185 \left[\frac{\text{MU\$D}}{\text{año}} \right] \quad (224)$$

Finalmente, operar el taladro a partir de la energía eléctrica provista por la red costaría aproximadamente 0,4185 millones de dólares por año. Comparando los costos de operación por año:

$$\text{Costo operación por año} = 2,214 \left[\frac{\text{MU\$D}}{\text{año}} \right] - 0,4185 \left[\frac{\text{MU\$D}}{\text{año}} \right] \simeq 1,8 \left[\frac{\text{MU\$D}}{\text{año}} \right] \quad (225)$$

En otras palabras, la sustitución de los motores diésel por electricidad proveniente de la red de media tensión permitiría a la empresa operadora lograr un ahorro anual aproximado de 1,8 millones de dólares.

En conclusión, esta alternativa no solo contribuiría de manera significativa a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también ofrecería un beneficio económico sustancial, al disminuir de forma notable los costos operativos asociados a la operación del taladro. Este caso evidencia la importancia de adoptar estrategias energéticas que equilibren la sostenibilidad ambiental con la viabilidad económica, promoviendo decisiones que resulten favorables tanto para el medio ambiente como para la rentabilidad del sector.

Rentabilidad y recuperación de la inversión del proyecto

En esta sección se presenta el análisis económico-financiero del proyecto, orientado a evaluar su rentabilidad y la recuperación de la inversión.

En primer término, se determina el monto de la inversión inicial necesaria (CAPEX). Conforme se expuso previamente, la selección de los componentes críticos contó con la aprobación del fabricante WEG; en consecuencia, a continuación se enumeran los precios de compra correspondientes, expresados en dólares estadounidenses (USD).

- Generador END GPA500 - 2500KVA - 60Hz - 1800RPM - 04P - B20E - ICO1 IP23W: **US\$176.700,00**
- Motor W60A 500C - 2700KW - 4P - B3L - 6600V - 60Hz: **US\$171.013,00**
- Convertidor de media tensión MVW 3000 para motor: 2700kW - 6,6kV - 280,70A 60Hz, aplicación equipo de perforación: **US\$337.050,00**
- Transformador OLEO 2,5MVA - 33/6,6kV - 50Hz - AI/AI: **US\$111.100,00**

Asimismo, deben contemplarse las celdas de media tensión destinadas a la entrada de acometida, la medición y la protección ubicadas aguas arriba del transformador. Si bien la selección se orientó a equipos Ormazabal, no fue posible obtener precios oficiales; así que se consultaron distintos fabricantes y páginas destinadas a vender productos de media tensión, como Knkong Electric Co y Larson Electronics, para contar con un valor de referencia. Para una tensión de 33 kV, los rangos publicados oscilan entre US\$ 6000 y US\$ 15000 por celda. En consecuencia, y adoptando un criterio conservador para el presupuesto, se estima US\$ 15.000 por unidad. Luego:

- Celdas de MT 33 [kV] para entrada de acometida, medición y protección:
3 * 15.000 [US\$]: **US\$45.000,00.**

Todos estos equipos se fabrican en el exterior y los precios informados corresponden a condiciones FOB (Free On Board), es decir, al valor en origen con transferencia del riesgo al momento de la carga a bordo en el puerto de embarque. En consecuencia, a dichos montos deben adicionarse el flete internacional (marítimo en este caso) —y, de corresponder, el seguro—, así como los tributos y gastos de importación/nacionalización. Al momento de elaboración de esta tesis, en Argentina los principales conceptos aplicables se enumeran a continuación.

Figura 144

DIE %	12,6%	Derecho de Importación Extrazona (DIE)
TE %	3%	Tasa de Estadística: Ver Montos Máximos y Excepciones - Mercosur Exceptuado
DII %	0%	Derecho de Importación Intrazona (DII)
IVA %	21%	Impuesto al Valor Agregado (I.V.A.) - Alícuota General: 21%
IVA Ad. %	20%	I.V.A. Percepción (Adicional): 20% (R.G. 4461/19)
IG %	6%	Anticipo del Impuesto a las Ganancias: 6% - Ver Excepciones
IIBB %	2,5%	Ingresos Brutos: 2,5%

Nota: Tratamiento arancelario en Argentina en 2025.

Muchas de las empresas que tienen un tamaño considerable y se dedican a la industria del *Oil&Gas* están exentas del I.V.A adicional, por lo que se lo va a omitir para el análisis.

Entonces, la sumatoria de impuestos a pagar resulta:

Tabla 16

Impuesto	Porcentaje
Derecho de Importación Extrazona (DIE)	0,126
Tasa de Estadística (TE)	0,03
Impuesto al Valor Agregado (I.V.A)	0,21
Anticipo del Impuesto a las Ganancias (IG)	0,06
Ingresos Brutos (IIBB)	0,025
Sumatoria de impuestos	0,451

Nota. Sumatoria de impuestos.

El coeficiente integral de importación y nacionalización resulta de 1,451.

Finalmente, los precios de estos equipos —ya nacionalizados en Argentina y listos para su montaje— se obtienen afectando a los valores de compra por el coeficiente integral de importación y nacionalización. De este modo, los montos resultantes corresponden a precios puestos en planta/obra:

Tabla 17

Componente	Precio de compra	Precio final
Alternador	US\$ 176.700	US\$ 256.392
Motor	US\$ 171.013	US\$ 248.140
VFD	US\$ 337.050	US\$ 489.060
Transformador	US\$ 111.100	US\$ 161.206
Celdas MT	US\$ 45.000	US\$ 65.295

Nota. Precios finales de cada equipo.

Por último, se debe considerar el costo de transporte y recepción de las cargas. Una buena estimación para cargas que vienen en contenedores (flete marítimo) es la de 1 dólar por kg; este valor también contempla los gastos en destino. Se procede a realizar el cálculo de peso total de todos los componentes:

$$\Sigma Pesos [kg] = Peso_{alternador} + Peso_{motor} + Peso_{VFD} + Peso_{transformador} + Peso_{celdas} \quad (226)$$

$$\Sigma Pesos [kg] = 6700 [kg] + 6121 [kg] + 12000 [kg] + 5800 [kg] + 817 [kg] \quad (227)$$

$$\Sigma Pesos [kg] = 31438 [kg] \quad (228)$$

Por ende, el precio del flete marítimo y de la recepción de la carga en el país es de **US\$31.438,00.**

Luego corresponde estimar el costo del cable y del carretel. Para el primero, según CablesOnline, un cable subterráneo de media tensión Cimet de aluminio, con aislación XLPE, 1×240 [mm²], categoría II y conforme IRAM 2178 tiene un costo por metro de ARS \$67.691,95 (pesos argentinos ya que se trata de un fabricante local - incluye impuestos nacionales).

Teniendo en cuenta que el largo total del cable es de 300 metros, el costo del cable asciende a

$$300 [m] * 67.691,95 \left[\frac{\$}{m} \right] = \$20.307.585 \quad (229)$$

Considerando que, a la fecha, los cables de aluminio extraflexibles no están estandarizados y suelen fabricarse a medida del proyecto, se aplica un adicional del 15 % sobre el precio, resultando así un costo final de $\$20.307.585 * 1,15 = \$23.353.723$. Para unificar moneda, se convierte a dólares estadounidenses al tipo de cambio oficial del período (\approx ARS 1.400/USD), obteniéndose un costo aproximado de:

- Cable subterráneo Cimet de aluminio con aislación XLPE MT 1×240 [mm²]

$$\text{categoría II x 300 [m]: } \frac{23.353.723 [\$]}{1400 \left[\frac{\$}{US\$} \right]} \approx \text{US\$ 17.000}$$

Respecto del carretel, tal como se indicó en su sección específica, puede fabricarse a medida. Se solicitó a la empresa un presupuesto estimativo de materiales para un carretel construido en chapa de acero inoxidable AISI 304, que incluya también eje central, refuerzos internos y base o soporte estructural. Como referencia, se informó un valor estimado de **US\$ 50.000**.

Adicionalmente, deben considerarse el costo de fabricación de los chasis y la mano de obra, tanto para la fabricación metalúrgica como para el montaje y conexión de los equipos. La empresa aportó valores estimativos que constituyen una aproximación razonable de los costos reales. Asimismo, se incorporó un rubro “Varios” para contemplar protecciones, seccionadores, conectores, tableros, entre otros componentes. Todos estos importes se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 18

Listado de precios estimativos			
Componente	Precio unitario (US\$)	Cantidad	Precio total (US\$)
Chasis	50.000	2	100.000
Varios	200.000	1	200.000
Mano de obra	100.000	1	100.000

Nota. Precio total de cada componente.

Por último, a continuación se presenta el detalle completo de los costos y el monto total de la inversión del proyecto.

Tabla 19

Componentes	Precio (US\$)	Precio relativo (%)
Alternador	256.392	14,92
Motor	248.140	14,44
VFD	489.060	28,46
Transformador	161.206	9,38
Celdas MT	65.295	3,80
Flete + gastos en el país	31.438	1,83
Cable	17.000	0,99
Carretel	50.000	2,91
Chasis	100.000	5,82
Varios	200.000	11,64
Mano de obra	100.000	5,82
Costo total de inversión	1.718.531	100

Nota. Resumen de precios.

Finalmente, el costo total de inversión del proyecto es de **US\$1.718.531,00**.

Por último, para analizar la rentabilidad del proyecto se debe determinar primero la recuperación de la inversión. Para eso, se debe tener en cuenta lo que se ahorra la empresa operadora por mes al realizar la sustitución de diésel por energía eléctrica; se había determinado previamente que esta sustitución permitía un ahorro de aproximadamente 1,8 millones de dólares al año, lo que significa que:

$$\text{Ahorro por mes} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{mes}} \right] = \frac{1800000 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{año}} \right]}{12 \left[\frac{\text{meses}}{\text{año}} \right]} = 150000 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{mes}} \right] \quad (230)$$

Se realiza un diagrama de flujos de cajas simplificados, considerando únicamente el ahorro mensual de la empresa operadora:

Tabla 20

Meses	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Egresos													
Inversión total	\$ 1.718.531,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ingresos													
Ahorro costo operación	0	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00	\$ 150.000,00
Flujos de caja	-\$ 1.718.531,00	-\$ 1.568.531,00	-\$ 1.418.531,00	-\$ 1.268.531,00	-\$ 1.118.531,00	-\$ 968.531,00	-\$ 818.531,00	-\$ 668.531,00	-\$ 518.531,00	-\$ 368.531,00	-\$ 218.531,00	-\$ 68.531,00	\$ 81.469,00

Nota: Flujo de cajas simplificado.

Luego, el *payback* simple (repago) resulta:

$$PB = \frac{1.718.531}{150.000} = 11,46 \text{ meses} \quad (231)$$

Sin embargo, este análisis no tiene en cuenta el valor del dinero. Para ello, se debe calcular el *payback* descontado, que considera una tasa anual de descuento. En este caso, se asume una tasa anual del 20%, que es un intermedio entre un análisis real y uno conservador.

Primero, se debe calcular el flujo descontado:

$$FC_d = \frac{FC}{(1+r_m)^t} \quad (232)$$

Siendo:

- FC : flujo nominal (150.000 dólares)
- t : mes
- r_m : tasa de descuento mensual. Se calcula de la siguiente manera:

$$r_m = (1 + r_a)^{\frac{1}{12}} - 1 \quad (233)$$

Si la tasa de descuento anual es del 20% ($r_a = 0,2$), la tasa de descuento mensual

resulta:

$$r_m = (1 + 0,2)^{\frac{1}{12}} - 1 = 0,0153 = 1,53\% \quad (234)$$

De esta forma, se obtiene el siguiente diagrama de flujos:

Tabla 21

Mes	Flujo nominal (USD)	Flujo descontado (USD)	Acumulado descontado (USD)
0	-\$ 1.718.531	-\$ 1.718.531	-\$ 1.718.531
1	\$ 150.000	\$ 147.738	-\$ 1.570.793
2	\$ 150.000	\$ 145.511	-\$ 1.425.282
3	\$ 150.000	\$ 143.316	-\$ 1.281.966
4	\$ 150.000	\$ 141.155	-\$ 1.140.810
5	\$ 150.000	\$ 139.027	-\$ 1.001.783
6	\$ 150.000	\$ 136.931	-\$ 864.853
7	\$ 150.000	\$ 134.866	-\$ 729.987
8	\$ 150.000	\$ 132.832	-\$ 597.155
9	\$ 150.000	\$ 130.829	-\$ 466.325
10	\$ 150.000	\$ 128.857	-\$ 337.469
11	\$ 150.000	\$ 126.914	-\$ 210.555
12	\$ 150.000	\$ 125.000	-\$ 85.555
13	\$ 150.000	\$ 123.115	\$ 37.560

Nota: Flujo de cajas considerando el valor del dinero.

Luego, el *payback* descontado se calcula de la siguiente manera:

$$PB_d = (t - 1) + \frac{|Acumulado_{t-1}|}{FC_d} \quad (235)$$

$$PB_d = (13 - 1) + \frac{|-85.555|}{123.115} = 12,7 \text{ meses} \quad (236)$$

Considerando el valor temporal del dinero, la inversión inicial se recupera en 12,7 meses, es decir, durante el primer mes del segundo año del proyecto.

Para establecer la rentabilidad del proyecto es necesario definir su horizonte de vida útil. En el presente caso, dicho horizonte queda condicionado por el cable que vincula la estación transformadora con la estación generadora. La reiterada operación de enterrado y desenterrado a lo largo del año introduce riesgos de degradación por solicitaciones mecánicas, abrasión y exposición a la humedad; aun con la implementación de conductos o protecciones mecánicas, la manipulación periódica incrementa la probabilidad de daño acumulativo. En consecuencia, y adoptando un criterio conservador, se fija la vida útil del proyecto en cinco años.

Se procede a calcular el valor actual neto (VAN) para la vida útil del proyecto. La fórmula del VAN es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{A}{(1+r_m)^t} \quad (237)$$

Siendo:

- I_0 : inversión inicial
- A : el ahorro mensual
- N : la cantidad de meses del proyecto (5 x 12 = 60 meses)

Como el ahorro es constante, se puede usar la fórmula de anualidad para calcular la sumatoria:

$$\sum_{t=1}^N \frac{A}{(1+r_m)^t} = A * \frac{1-(1+r_m)^{-N}}{r_m} \quad (238)$$

Luego, el VAN resulta:

$$VAN = -1.718.531\$ + 150.000\$ * \frac{1-(1+0,0153)^{-60}}{0,0153} \quad (239)$$

$$VAN = 4.143.209\$ \quad (240)$$

Por último, se calcula la tasa interna de retorno (TIR). La TIR mensual es la tasa r que hace $VAN = 0$:

$$0 = -I_0 + A * \frac{1-(1+r_m)^{-N}}{r_m} \quad (241)$$

$$I_0 = \frac{1-(1+r_m)^{-N}}{r_m} \quad (242)$$

No tiene solución analítica cerrada, entonces, se procede a calcular mediante una planilla de cálculo. Con $I_0 = 1.718.531\$$, $A = 150.000\$$ y $N = 60$, la TIR mensual resulta:

- $r = 0,086688 = 8,6689 \%/mes$

Luego, la TIR anual equivalente se determina de la siguiente manera:

$$(1 + r)^{12} - 1 = (1 + 0,086688)^{12} - 1 = 171,18 \%/año \quad (243)$$

Esta TIR resulta muy alta porque el *payback* es de aproximadamente de un año, es decir que, después de recuperar la inversión, hay cuatro años más de “renta” positiva.

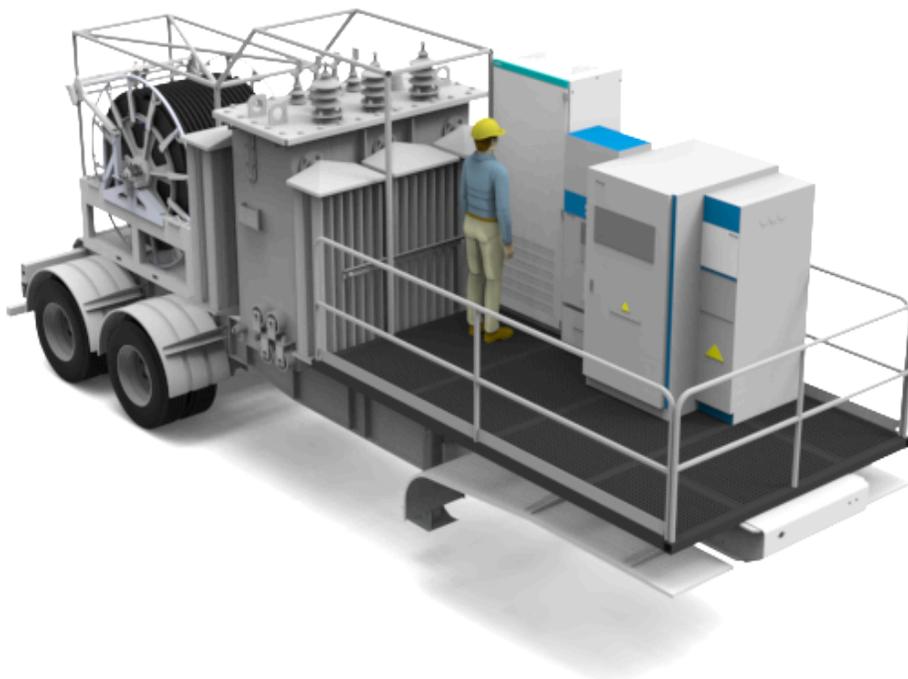
En conclusión, con una inversión inicial de USD 1,72 millones y un ahorro operativo estimado de USD 150.000/mes, el período de repago simple es de 11,5 meses. Considerando el valor del dinero en el tiempo, el repago descontado se ubica en 13 meses para una tasa anual del 20 %. El Valor Actual Neto resulta fuertemente positivo (USD 4,14 millones a cinco años con 20 % anual), lo cual demuestra la robusta conveniencia económica del reemplazo de diésel por energía eléctrica aún bajo supuestos conservadores. En consecuencia, el proyecto es rentable y recupera su inversión en aproximadamente un año.

Modelos 3D

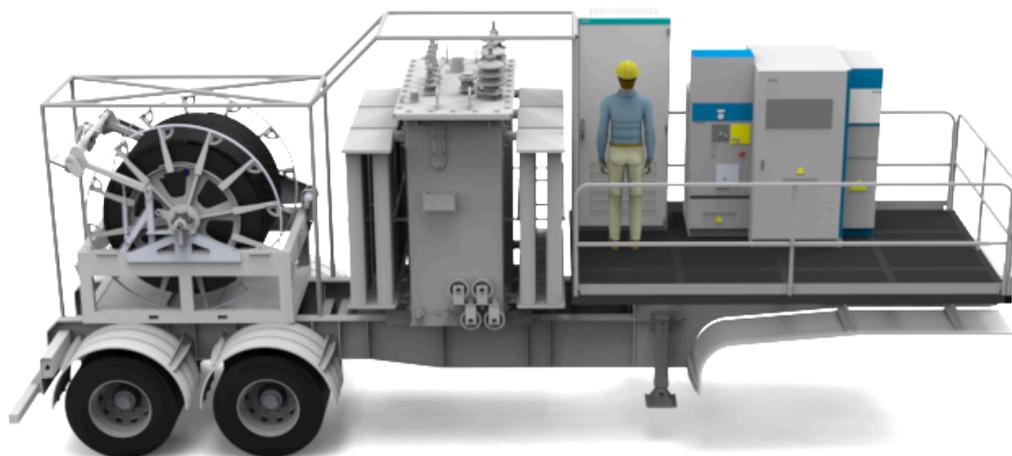
Para finalizar el informe, se incorporan los modelos 3D (*renders*) de los equipos móviles correspondientes a la Alternativa 1, identificada a lo largo del trabajo como la opción más conveniente. Tal como se indicó en la sección de verificación de tráilers, estas configuraciones son esquemáticas: si bien representan adecuadamente la disposición prevista de los componentes, pueden requerir ajustes y/o modificaciones en la instancia de ingeniería de detalle y fabricación. Asimismo, no se han modelado los circuitos auxiliares, cables de conexión, soportes ni otros elementos complementarios.

Estación transformadora móvil

Figura 145



Nota: Vista isométrica de la estación transformadora móvil.

Figura 146

Nota: Vista lateral de la estación transformadora móvil.

Estación generadora móvil

Figura 147



Nota: Vista isométrica de la estación generadora móvil (junto con el camión).

Figura 148

Nota: Vista lateral de la estación generadora móvil (junto con el camión).

Conclusión

El análisis técnico-económico desarrollado permite concluir que la Alternativa 1, la solución móvil compuesta por estación transformadora próxima a la red de MT y *genset* eléctrico junto al taladro, conectados mediante cable en carretel, es la opción más conveniente para electrificar el equipo de perforación en Vaca Muerta. Esta alternativa resuelve de manera robusta el desacople de tensiones y frecuencias (33 [kV] / 50 [Hz] → 600 [V] / 60 [Hz]) y, al mismo tiempo, aporta flexibilidad operativa frente a distancias típicas de 100–300 [m] entre locación y red. Además, es una solución móvil y simple de desplegar, con menos puntos críticos de integración, menor riesgo y mejor control de costos y plazos que las otras alternativas.

En lo ambiental, la sustitución de la generación diésel por energía eléctrica proveniente de la red permite una reducción cercana al 70% de las emisiones de GEI, contribuyendo de forma directa al cumplimiento de los compromisos de la Agenda 2030 y acompaña los objetivos de descarbonización del sector. Este impacto es significativo y se logra sin comprometer la disponibilidad y confiabilidad del sistema.

En lo económico, el caso base diésel implica un gasto del orden de USD 2,214 millones/año solo en combustible; al migrar a la solución eléctrica, el proyecto permite ahorros del orden de USD 150.000/mes, que se utilizaron para evaluar la rentabilidad financiera. Con esos flujos, el *payback* descontado se alcanza en aproximadamente 12,7 meses, el VAN a cinco años resulta positivo y elevado (USD 4,14 millones), y la TIR mensual es significativamente superior a la tasa de descuento adoptada. Estos indicadores muestran un proyecto rentable y robusto frente a variaciones razonables de precios de la energía.

En síntesis, la Alternativa 1 se elige porque combina solidez técnica, implementación sencilla y riesgo acotado, y porque maximiza los beneficios ambientales y económicos de la

electrificación. La propuesta mejora la competitividad de la operadora y reduce su huella de carbono, dejando margen para futuras mejoras a medida que evolucione la infraestructura eléctrica de la región.

Referencias

- Skalany, M. (2018). *Informe estimulación por fractura hidráulica en formaciones no convencionales*.
- Herrera Herbert, J. (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. I: Origen y características de los hidrocarburos. 2ª Edición revisada y actualizada*.
- Herrera Herbert, J. (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. II: Actividades de Ingeniería, instalaciones y equipos. 2ª Edición revisada y actualizada*.
- Herrera Herbert, J. (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. III: Sistemas básicos y procesos de los equipos de perforación. 2ª Edición revisada y actualizada*.
- Aranguren, J.J., Bohórquez, C.A., Cabezas, A., Chacón Monsalve, C.A., Gallego Ortiz, M.F., González, E., Legarda, M.A., Zapata, J.V. (2022). *Fracturación Hidráulica con Perforación Horizontal: oportunidades y retos para garantizar la seguridad energética y el desarrollo social en Colombia*.
- PricewaterhouseCoopers. (14 de noviembre de 2024). *Prevén superávit energético de u\$s30.000 millones para Vaca Muerta en 2030. Energy Report*.
https://www.ambito.com/energia/preven-superavit-energetico-us30000-millones-vaca-muerta-2030-n6081972?utm_source=chatgpt.com
- INSST (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo). (2023). *Emisiones de motores diésel: Documentación toxicológica para el VLA — Establecimiento del límite de exposición profesional de las emisiones de motores diésel (DLEP 148)*.
[INSST..https://www.insst.es/documents/94886/6645067/DLEP+148+-+A%C3%B1o+2023.pdf/717843f8-8433-0bcf-2521-451f1a97ebc2?version=1.0&t=1702976918120](https://www.insst.es/documents/94886/6645067/DLEP+148+-+A%C3%B1o+2023.pdf/717843f8-8433-0bcf-2521-451f1a97ebc2?version=1.0&t=1702976918120)
- Klinge Corporation. (n.d.). *What is a genset?*.<https://klingecorp.com/blog/what-is-a-genset/>

Tadeo Czerweny. (s.f.). *Estaciones transformadoras móviles*. Tadeo

Czerweny. <https://www.tadeoczerweny.com.ar/estaciones-transformadoras-moviles/>

Humo diésel. (15 de junio de 2024).

EnWikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Humo_di%C3%A9sel

Chapman, S.J. (2012). *Máquinas eléctricas*. Quinta edición.

Terzaghi, V. (22 de junio de 2024). *Más gas y petróleo: Vaca Muerta superó los 2200 pozos conectados*. Energíaon. https://www.google.com/url?q=https://www.rionegro.com.ar/energia/mas-gas-y-petroleo-vaca-muerta-supero-los-2-200-pozos-conectados-3645209/?utm_source%3Dchatgpt.com&sa=D&source=docs&ust=1741704834963141&usq=AOvVaw3Rjb_Owk2f3kZ61E3IBLQ_

Ojeda, A. (26 de febrero de 2025). *Vaca Muerta comenzó el año duplicando la cantidad de pozos conectados*. Más Energía.

https://mase.lmneuquen.com/produccion/vaca-muerta-comenzo-el-ano-duplicando-la-cantidad-pozos-conectados-n1176460?utm_source=chatgpt.com

WEG (Julio de 2022). *Convertidor de Frecuencia de Media Tensión. MVW3000. Manual del Usuario*.

Brown, Boveri (1983). *Manual de las instalaciones de distribución de energía eléctricas*. Primera edición.

CELDAS DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA cgm.3 Gama modular y compacto con aislamiento integral en gas.

Media móvil. (2023, 15 de marzo). En Wikipedia.

https://es.wikipedia.org/wiki/Media_m%C3%B3vil

Ferreya, R. (s.f.). *Instalaciones Eléctricas*. Facultad de Ingeniería - UNMDP.

CIMET OPTEL. (2023). *Catálogo de productos*.

Guía completa de reductores: Principios y usos industriales. (29 de julio de 2024). Auma Iberia.

<https://aumaiberia.com/reductores-guia-completa/>

Diferencia entre Motores Síncronos y Asíncronos. (s.f.). HVH Industrial Solutions.

<https://hvhindustrial.com/es/blog/diferencia-entre-motores-s%C3%ADncronos-y-asincr%C3%B3nicos>

NIT-edu.org. (2021). Synchronous

motor. <https://nit-edu.org/wp-content/uploads/2021/09/ch-38-Synchronous-motor.pdf>

NGC. (2019). Industrial gearboxes.

https://ngcamericas.com/wp-content/uploads/2022/01/NGC-Industrial-Gearboxes_20190523_dp.pdf

N.d. (s.f.). 9 industrial gearbox maintenance tips. NW Industrial Sales.

<https://nwindustrialsales.com/blog/9-industrial-gearbox-maintenance-tips/>

Gearbox performance. (s.f.). Pumps & Systems.

<https://www.pumpsandsystems.com/gearbox-performance>

TMEIC Corporation. (junio de 2021). Drive Solutions for the Oil and Gas Industry.

<https://tmeic.com/wp-content/uploads/2025/04/Oil-Gas-Brochure-I-5002-June2021-web.pdf>

Frequency Converter vs. Variable Frequency Drive.

<https://www.ato.com/frequency-converter-vs-variable-frequency-drive>

Wells, N. J. (2022). Analysis of Emissions Profiles of Hydraulic Fracturing Engine Technologies

[Tesis de maestría, West Virginia University]. The Research Repository @ WVU.

Climate Transparency. (2019). Brown to Green: The G20 Transition Towards a Net-Zero

Emissions Economy, Argentina Country Profile.

Bloomberg L.P. (2024). Argentina - Climatescope 2024.

<https://www.global-climatescope.org/markets/argentina>

MP Husky. (2024). **CABLE BUS BROCHURE**. [Folleto].

<https://mphusky.com/wp-content/uploads/2024/02/2024-CABLE-BUS-BROCHURE.pdf#:~:text=Since%20Cable%20Bus%20is%20often.In%20some%20cases%2C%20the%20Ca%20AD>

Merlin Gerin. (1997). **Masterpact circuit breaker: Universal power breaker** [Manual de instrucciones]. <https://www.electricalpartmanuals.com/pdf/circuitBreaker/Merlin%20Gerin/Breakers/I.G.MASTERPACTUNIVERSALPOWERBREAKER.pdf#:~:text=%E2%80%A2%20the%20busbars%20should%20be.again%20essential%20to%20ensure%20the>

ABB. (2014). **Feeder Protection REF601/REJ601 Application Manual** (Document ID: 1MDU07212-YN, Rev. C). ABB.

https://library.e.abb.com/public/528b753832fe6eebc1257d56002f913d/REF601_um_1MDU07212-YN_ENc.pdf#:~:text=The%20stage%20includes%20ten%20different.0%20120

Taishan Transformer. (2025, 21 de agosto). **Critical performance parameters for selecting a power transformer**. Taishan Transformer.

<https://www.taishantransformer.com/power-transformer-performance-parameters/>

Data Visual Expert. (s.f.). *Semi-trailer parts diagram*.

https://datavisualexpert.com/semi-trailer-parts-diagram?utm_source=chatgpt.com

Vialidad Nacional. (s.f.). *Infraestructura vial y corredores*. Ministerio de Transporte de la Nación.

<https://www.youtube.com/watch?v=YIDaENG7iyw>

Ferreya, R. (s.f.). *LAS PROTECCIONES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN: EL TRANSFORMADOR*. Facultad de Ingeniería - UNMDP.