



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Ingeniería Náutica, Marina y Radioelectrónica Naval (ENMRN)**

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas  
Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de  
Inercia”**

**Tesis doctoral realizada por:  
Antonio Herrero-Sabat**

**Director: Dr. Jaime Rodrigo de Larrucea  
Codirector: Dr. Ricard Bosch-Tous**

**Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC)  
Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas (CEN)**

**Barcelona, 30 noviembre 2022**



## Corolario para Armadores

- La propulsión naval involucra grandes masas, que han de interaccionar con las fuerzas elásticas y fricciones del agua, para mantener la estabilidad durante la operación de la nave.
  - Las oscilaciones en escora o asentamiento, vienen gobernadas por las masas y fuerzas de tipo elástico, siendo amortiguadas por las fricciones.
  - Para ganar eficiencia se intenta minimizar las fricciones, esto penaliza la estabilidad frente a perturbaciones.
  - En electricidad, las fricciones representan la energía activa. Masas y fuerzas elásticas, la energía reactiva, que fluye entre alternadores, inductancias y condensadores.
- **Para una propulsión naval eléctrica estable, segura y eficiente, no hay que olvidar la energía reactiva.**





## I. AGRADECIMIENTOS

A mis directores, Dr. Jaime Rodrigo de Larrucea y Dr. Ricard Bosch-Tous, por su perseverancia en esta Tesis, por sus enseñanzas y por el apoyo continuo y desinteresado que me han dado.

A la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC), por darme la oportunidad de cursar este Doctorado en Barcelona, elemento que ha resultado relevante para poder llevarlo a cabo.

A la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de Ingeniería Eléctrica (DEE), por permitirme utilizar sus laboratorios eléctricos, sus equipamientos, motores, grupos electrógenos y el consumo de materiales. En especial al Sr. Quim de Feo responsable operativo de los laboratorios.

A la firma Nidec-Control Techniques, por la donación de los Convertidores de Frecuencia del sistema Regenerativo construido y al apoyo de sus técnicos, José Pastor Nicolau e Ignacio Joaniquet, por su soporte técnico.

A la “Cuenta de servicios a la industria CTT-UPC”, del Dr. Ricard Bosch-Tous, para la financiación de la apartamentada de protección y maniobra, del prototipo construido de Acumulador Cinético de Energía Eléctrica, (ACEE).

A mis queridos amigos y colaboradores: Joan Medes-García, experto en instrumentación y ensayos del Centro Técnico de “SEAT” y Toni Duran-Pascual, titulado de la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC) en Grado en Tecnologías Marinas y Grado en Ingeniería de Sistemas y Tecnología Naval, cuya ayuda ha sido de un gran valor.

Por último, agradecer a mi familia y en especial a mis hijos, por el soporte moral que siempre me han dado durante todo el proyecto.

No quisiera olvidarme de mis padres que, con inmensos esfuerzos, hicieron posible que hoy este presentando mi Tesis Doctoral en la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC).



## II. RESUMEN

Las caídas de plantas de generación eléctrica a bordo o *Power Blackouts*, ponen en jaque a la seguridad de la tripulación, de los buques y del medio ambiente.

Los motores de inducción de potencia significativa en kW en relación a los kVA del alternador, como pueden ser los motores transversales de proa, provocan en el arranque directo o incluso en algunos episodios de arranque estrella-triángulo, profundos huecos de tensión que desestabilizan las plantas de generación eléctrica, llegando a provocar en algunos casos un *Power Blackout*.

Para comprender la importancia y la gravedad de los daños producidos por estos *Power Blackouts*, se acude a la fuente del CIAIM (Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes Marítimos), encontrando diversos casos de caídas de planta de generación eléctrica oficialmente registrados, algunos con resultados de graves daños a personas, como el del “Volcán de Tamasite” en 2017, a la salida de puerto con 140 heridos e importantes daños en el muelle y en el propio buque.

Para el estudio de las caídas de planta eléctrica y de sus posibles soluciones, se construye en los laboratorios del departamento de Ingeniería Eléctrica (DEE) de la Escuela Tècnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), una réplica a escala de planta eléctrica con varios grupos electrógenos, alimentando arranques en vacío de motores eléctricos de inducción, cuyos arranques son considerados los transitorios más severos a bordo, permitiendo replicar situaciones reales a escala, de caída de planta eléctrica (calado de la maquina térmica) o *Power Blackout*.

Además, se diseña y construye un sistema (ACEE) “Acumulador cinético de energía eléctrica”, que consta de un motor de inducción III, de 9 kW, 400 V, 50 Hz, con volante de inercia de 40 kg, girando a 1.500 rpm y que genera 7,4 kJ de energía acumulada. Este acumulador cinético dispone de regulación electrónica, es regenerativo y programable.

Su aportación es tanto de potencia activa, como descarga de la energía cinética acumulada en su volante de inercia, como de reactiva, desde los condensadores de los propios convertidores de frecuencia (VSD) y del condensador que lleva el sistema. Su proporción es ajustable electrónicamente.

Se estudian situaciones y formas de evitar las caídas de planta, haciendo actuar el sistema de acumulador cinético de energía eléctrica, (ACEE) construido, resultando idóneo para la experimentación referida.

Las conclusiones a las que llega esta tesis para resolver adecuadamente este problema son:

1. Sobredimensionar los alternadores de los conjuntos Diesel-Alternador, cuyo factor de potencia tradicionalmente es 1 o 0,8, de tal forma que pueda alimentar en permanencia, cargas con  $\cos \phi = 0,5$  o inferior en el caso de buques con propulsión eléctrica. En el caso límite de regulación electrónica

de velocidad de los propulsores eléctricos, con posicionamiento dinámico, pueden llegar a ser preciso grupos electrógenos capaces de alimentar cargas a  $\cos \phi = 0,2$ .

Es necesario, además un criterio sofisticado de control de la excitación de estos alternadores, durante los episodios de arranque de propulsores eléctricos de inducción, que pueden durar algún segundo. Esto afecta al coste de los elementos de control de tensión del alternador, que han de poder suministrar corrientes superiores a la nominal, manteniendo su tensión en bornes en estos eventos.

El sistema de protección, debe monitorizar el tiempo que la corriente sobrepasa el valor nominal, desconectando las cargas si este tiempo supera lo previsto o admisible, garantizando que las temperaturas del conjunto, no alcancen valores peligrosos.

Esta solución es la más simple y económica, para alimentar propulsores eléctricos de inducción y sus arranques, manteniendo tensiones y energías reactivas en valores estables y controlados a nivel del milisegundo. Algunos astilleros no los sobredimensionan, centrados exclusivamente en criterios de eficiencia y coste, sin tener en cuenta el riesgo que asumen, sacrificando, sin saberlo, la estabilidad de las plantas eléctricas que construyen.

## 2. Instalación de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE).

La solución alternativa que se propone, es el montaje de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE). Aunque su coste es significativamente superior al sobredimensionado del alternador, es recomendable en los casos de buques existentes donde el espacio, coste, viabilidad de la extracción y montaje del nuevo alternador se vean comprometidos. Los trámites administrativos y su coste pueden llegar ocasionalmente a ser equiparables o incluso menores, siendo, además, una solución fiable, de mantenimiento asumible, ajustable a cada instalación, escalable en potencia y de muy fácil ubicación a bordo.

Estos acumuladores (ACEE), además de sus propios elementos capacitativos integrados en los (VDF), suelen ir acompañados por grupos de condensadores, para aumentar la energía reactiva aportada y la velocidad de reacción del sistema.

Este trabajo, pretende ser una aportación tecnológica para resolver esta problemática, asegurando la alimentación de cargas dinámicas, con estabilidad y consumo de combustible optimizado.



### III. ABSTRACT

The failure of power generation plants on board or Power Blackouts, put the safety of the crew and ships in check. Induction motors with a significant power in kW in relation to the kVA of the alternator, such as transverse bow motors, cause deep voltage dips during direct start-up or even in some star-delta start-up episodes, which destabilize power generation plants, in some cases causing a Power Blackout.

To understand the importance and seriousness of the damage caused by these Power Blackouts, the source of the CIAIM (Maritime Accident and Incident Investigation Commission) was found, finding various cases of officially registered power plant blackouts, some with results of serious damage to people, such as the "Tamasite Volcano" in 2017, leaving the port with more than 140 injured and significant damage to the dock and the ship itself.

For the study of power plant blackouts and their possible solutions, a scale replica of a power plant with several generator sets, feeding without load starts of electric induction motors, whose starts are considered the most severe transients on board, allowing replicating real-scale situations of power plant failure (heat engine stall) or Power Blackout. In addition, a kinetic accumulator of electrical energy system (ACEE) is designed and built, consisting of an induction motor III, 9 kW, 400 V, 50 Hz, with a 40 kg flywheel, rotating at 1500 rpm and with 7.4 kJ of accumulated energy. This kinetic accumulator has electronic regulation, is regenerative and programmable.

Situations and ways of avoiding plant failures are studied, making the kinetic accumulator system of electrical energy (ACEE) built, act, resulting ideal for the aforementioned simulation.

The conclusions reached by this work to adequately solve this problem are:

1. Oversize the alternators of the Diesel-alternator sets, whose power factor is traditionally 1 or 0.8, in such a way that they can permanently supply loads with  $\cos \phi = 0.5$  or less in the case of ships with electric propulsion. In the limiting case of electronic speed regulation of electric drives, with dynamic positioning, generator sets capable of supplying loads at  $\cos \phi = 0.2$  may become necessary.

It is also necessary to have a sophisticated criterion for controlling the excitation of these alternators, during the starting episodes of electric induction propellants, which can last a few seconds. This affects the cost of the alternator voltage control elements, which must be able to supply currents greater than the nominal, maintaining their voltage at the terminals in these events.

The protection system must monitor the time that the current exceeds the nominal value, disconnecting the loads if this time exceeds what is expected or admissible, guaranteeing that the temperatures of the assembly do not reach dangerous values.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

This solution is the simplest and most economical, to power electric induction thrusters and their starters, maintaining voltages and reactive energies at stable and controlled values at the millisecond level.

Some shipyards do not oversize them, focusing exclusively on efficiency and cost criteria, without considering the risk they assume, unknowingly sacrificing the stability of the power plants they build.

2. Installation of kinetic accumulator electrical energy (ACEE). The proposed alternative solution is the assembly of kinetic electric energy accumulators (ACEE). Although its cost is significantly higher than the oversized alternator, it is recommended in cases of existing ships where the space, cost, feasibility of the extraction and assembly of the new alternator are compromised. Administrative costs and costs can be comparable or even lower, and it is also a reliable solution, affordable maintenance, adjustable to each installation, scalable in power and very easy to locate on board.

These (ACEE) accumulators are usually accompanied by groups of electrolytic capacitors, to increase the reactive energy provided and the reaction speed of the system.

This work aims to be a technological contribution to solve this problem, ensuring the feeding of dynamic loads, with stability and optimized fuel consumption.

## IV. ÍNDICE

I.	Agradecimientos .....	iii
II.	Resumen .....	v
III.	Abstract.....	viii
IV.	Índice .....	x
V.	Índice de Figuras.....	xvi
VI.	Índice de Tablas .....	xxvii
VII.	Índice de Ecuaciones .....	xxix
VIII.	Abreviaturas-Acrónimos.....	xxxii
IX.	Motivación.....	xxxiii
X.	Objeto del estudio .....	xxxv
XI.	Objetivo de la investigación .....	xxxvii
XII.	Alcance .....	xxxix
1	Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica. ....	41
1.1	Caídas de planta eléctrica.....	41
1.2	Estado del arte del de los acumuladores cinéticos (ACEE) .....	46
1.2.1	Aplicaciones y sectores relacionados .....	46
1.2.2	Producto acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE).....	52
1.3	Propuesta de sistemas de almacenamiento energético para cargas cíclicas a bordo .....	55
1.4	Jerarquización de cargas.....	56
1.5	Controlar o proteger. El gran dilema de las Plantas de Generación Eléctrica.....	57
1.6	Metodología del presente estudio.....	60
1.7	Medios.....	61
2	Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio .....	62
2.1	Circuito equivalente Thévenin, de una fuente de electricidad tipo batería de Pb-ácido.....	63
2.1.1	Aspectos tecnológicos .....	66
2.1.2	Agrupaciones de baterías .....	70
2.1.3	Arranque de motores Diesel con baterías.....	72
2.2	Instalaciones fotovoltaicas .....	74
2.3	Circuito equivalente de una maquina rotativa, tipo dinamo.....	76



2.3.1	Circuito equivalente de la dinamo excitada con imanes permanentes .....	79
2.3.2	Sistemas de excitación .....	81
2.3.3	Controladores de campo de las dinamos .....	84
2.4	Circuito equivalente de los alternadores síncronos .....	86
2.5	Circuito equivalente de un motor de inducción.....	89
2.6	Conclusiones de aplicación .....	91
3	Alternadores.....	93
3.1	Alternadores síncronos.....	93
3.1.1	Descripción.....	93
3.1.2	La máquina síncrona funcionando como generador y como motor .....	95
3.1.3	Regulación de la Frecuencia.....	97
3.1.4	Regulación de la excitación del campo magnético, (AVR) .....	98
3.1.5	Reacción de inducido .....	101
3.1.6	Influencia y efectos de la saturación .....	104
3.1.7	Alternadores síncronos acoplados en paralelo .....	106
3.1.7.1	Maniobras de acoplamiento .....	106
3.1.7.2	La máquina síncrona acoplada a una red de potencia infinita.....	110
3.1.8	Potencias activas. ....	111
3.1.9	Potencias reactivas. ....	112
3.1.10	Diagramas de potencias.....	114
3.1.11	Cortocircuitos de alternadores síncronos .....	116
3.1.12	Balance de Potencias, Activa y Reactiva .....	119
4	Problemática en las plantas de generación eléctrica.....	125
4.1	Cargas dinámicas.....	125
4.2	Caídas de Frecuencia.....	128
4.3	Huecos de tensión.....	129
4.3.1	Profundidad, duración y recuperación. Generación de reactiva Q.....	129
4.4	Caídas de planta. “Power Blackout” .....	131
5	Posibles soluciones de estabilidad .....	136
5.1	Tecnologías para aumentar la potencia transitoria, experiencias empíricas.....	136

5.1.1	Sobredimensionamiento del Alternador. Potencia activa P y reactiva Q.....	139
5.1.1.1	Arranque de grandes motores de inducción.....	140
5.1.1.2	Propulsores eléctricos de inducción, con ciclos de ola.....	143
5.1.2	Condensadores (Reactiva Q).....	147
5.1.3	Volantes De Inercia. Potencia activa P y su control electrónico (Q). .....	150
5.2	Propuesta experimental para ensayo en este trabajo .....	154
5.2.1	Propuesta de Acumulador Cinético de Energía Eléctrica (ACEE), para Plantas de Generación Eléctrica Navales. Prototipo para experimentación en la gama 10 kW	156
5.3	Análisis de control y protecciones.....	158
5.4	Resumen.....	160
6	Estrategia experimental desarrollada en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB-UPC).....	161
6.1	Motores de inducción empleados para emular los propulsores.....	161
6.2	(GE) Empleados, (AVR) su Alimentación y Realimentación para el control.....	163
6.2.1	Grupo electrógeno $\cos\phi=1$ , HONDA 6,4 kW/ 6,5 kVA.....	164
6.2.2	Grupo electrógeno $\cos\phi=0,5$ , RAS 4,6 kW / 8,5 kVA.....	165
6.2.3	Grupo de generación 15 kVA excitación manual.....	166
6.2.4	Grupo de generación 15 kVA con (AVR) electrónico autoalimentado.....	167
6.3	Reproducción en el Laboratorio de Cadenas Propulsoras para ensayar.....	168
6.4	Prototipo de acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE) 7,4 kJ/25 A .....	171
6.4.1	Prototipo de (ACEE) 7,4 kJ/25 A. Esquemas y Componentes Eléctricos.....	172
6.4.2	Especificación electromecánica y descripción del prototipo (ACEE) 7,4 kJ/25 A ..	182
6.4.2.1	Construcción y montaje del conjunto.....	182
6.4.2.2	Ficha técnica del sistema (ACEE) para ensayos: .....	185
6.4.2.3	Energía almacenable .....	186
6.4.2.4	Alerta de seguridad y Dimensiones principales .....	187
6.4.2.5	Funcionalidad esperada.....	190
6.4.2.6	Medidas de seguridad aplicadas.....	192
6.4.2.7	Instrumentos de medida utilizados.....	193
6.5	Software de programación y control .....	194

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

6.5.1.1	“CT Connect”. Parametrización.....	194
6.5.1.2	“CT Scope”. Registros oscilográficos.....	197
6.5.1.3	“MCS, Machine Control Studio”. Programación Plc.....	198
7	Mediciones experimentales.....	203
7.1	Ensayos previos realizados de los componentes .....	203
7.2	Puesta en servicio del sistema (ACEE) 7,4 kJ/25 A, conectado a la red.....	206
7.2.1	Ensayos con el Grupo Electrónico $\cos\phi=1$ , “HONDA”, 400 V, 6,4 kW-6,5 kVA.....	208
7.2.1.1	Propulsor “Novat”.....	209
7.2.1.2	Propulsor “ABB”.....	211
7.2.1.3	Propulsor Ventilador “ABB”.....	212
7.2.1.4	Propulsor “ABB” + Propulsor Ventilador “ABB”.....	213
7.2.2	Ensayos con el Grupo Electrónico $\cos\phi=0,5$ , “RAS”, 400 V, 4,6 kW-8,5 kVA .....	214
7.2.2.1	Propulsor “Novat”.....	215
7.2.2.2	Propulsor “ABB”.....	216
7.2.2.3	Propulsor Ventilador “ABB”.....	217
7.2.2.4	Propulsor “ABB” + Propulsor Ventilador “ABB”.....	218
7.3	Evolución de la corriente de excitación del alternador, controlada por el (AVR) .....	219
7.4	Evolución del regulador de combustible de un motor térmico.....	222
7.5	Resumen.....	227
7.6	Ensayos de conjuntos con el sistema (ACEE), 7,4 kJ/25 A .....	228
7.6.1	Puesta en servicio del conjunto GE RAS, sistema (ACEE).....	229
7.6.1.1	Control de regeneración del sistema (ACEE) 7,4 kJ/25 A, por consigna de velocidad controlando la rampa de frenado .....	229
7.6.1.2	Consigna de par.....	231
7.6.1.3	Primeros ensayos de arranque de propulsor.....	232
7.6.1.4	Duración de la descarga regenerativa.....	233
7.6.2	Análisis de armónicos de las tensiones generadas .....	235
7.6.2.1	Red de potencia infinita .....	235
7.6.2.2	Grupo eléctrico $\cos\phi=1$ Honda 6,4 kW / 6,5 kVA 400 V.....	236
7.6.2.3	Grupo eléctrico $\cos\phi=0,5$ , RAS 4,6 kW / 8,5 kVA 400 V.....	237

7.6.2.4	Grupo electrógeno $\cos \phi=0,5$ , RAS 4,6 kW / 8,5 kVA 400 V y Propulsor Novat 4 kW en vacío, como carga única .....	238
7.6.2.5	Sistema (ACEE).....	239
7.6.2.6	Optimización de contenido de armónicos, mediante sistemas de frente activo (AFE) en convertidores de frecuencia .....	240
7.7	Reflexiones a partir de los ensayos RAS+ACEE sobre las variables de control del inicio y final de la regeneración del (acee).....	241
7.7.1	Variación de la tensión de red alterna .....	242
7.7.2	Variación de la corriente de la carga .....	243
7.7.3	Variación de la frecuencia de alimentación.....	245
7.7.4	Variación de la tensión del Bus DC .....	246
7.7.5	Programa de Plc para descarga por nivel del Bus DC.....	247
7.7.6	Verificación de la descarga por nivel de Bus DC, con grupo electrógeno $\cos\phi=0,5$ , RAS, 4,6 kW/8,5 kVA, .....	249
7.8	Control Anticipativo.....	251
7.9	Control del final de la regeneración .....	254
7.10	Configuración del programa de Plc, para automatización de los ensayos con control anticipativo .....	256
7.11	Función regenerativa, optimización del tiempo de recuperación de la tensión y frecuencia del alternador .....	260
7.12	Influencia del par de frenado regenerativo.....	261
7.12.1	Energía generada.....	264
7.12.2	Influencia de la profundidad (rpm) y duración de la Regeneración.....	266
7.12.3	Duración de regeneración del (ACEE) vs. frecuencia del alternador sin carga. ....	268
7.13	Influencia de la anticipación de la descarga regenerativa .....	269
7.14	Conclusiones de la experimentación con (ACEE), 7,4 kJ/25 A.....	273
7.14.1	Resultados de las mejoras con el sistema (ACEE), 7,4 kJ/25 A .....	273
8	Conclusiones.....	275
8.1	Previas resumiendo la experimentación .....	275
8.2	Soluciones para la estabilidad de las plantas de generación de energía eléctrica a bordo	279
8.2.1	Sobredimensionado del alternador .....	280
8.2.2	Instalación de sistemas de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE)....	282

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

8.3	Tres criterios aparentemente antagonistas, que deben respetarse en el diseño de una planta de generación de energía eléctrica, a bordo.....	283
8.4	Conclusiones finales.....	285
9	Aportaciones del trabajo .....	287
10	Trabajos futuros .....	288
10.1	Estudio de armónicos del sistema (ACEE). .....	288
10.2	El sistema (ACEE) con cargas cíclicas. ....	288
10.3	Efecto giroscópico del sistema (ACEE). ....	288
10.4	Regulación de f-P, V-Q, mediante el sistema (ACEE), en alternadores limitados en el control de estas magnitudes. ....	288
11	Bibliografía.....	289
A	Anexos .....	297
A.1	Anexo 1 Oscilaciones torsionales observadas en la carga rotativa considerada .....	297
A.2	Anexo 2 Actividad académica.....	305
A.3	Anexo 3 Esquemas y Planos del sistema (ACEE) .....	311
A.4	Anexo 4 Operativa del sistema (ACEE) .....	316
A.5	Anexo 5 Control electrónico con alimentación monofásica .....	319
A.6	Anexo 6 Cargas reguladas externamente .....	324
A.7	Anexo 7 Antecedentes experimentales. Proyectos de referencia.....	328
A.8	Anexo 8 Costes del sistema (ACEE).....	335
A.9	Anexo 9 Impacto medio ambiental .....	337

## V. ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Chasis, Montaje del motor eléctrico de 9 kW, 400 V, 50 Hz y volante de inercia del prototipo de acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE) construido. Fuente: Propia. ....	xxxix
Fig. 2 Fases de Montaje y Acabado del Prototipo (ACEE) construido. Fuente: Propia. ....	xl
Fig. 3 Grave accidente causado por una caída de planta en el “Volcán de Tamasite”. Fuente: CIAIM 2017. ....	44
Fig. 4 Perfil de energía absorbida por la prensa en un ciclo (2s) (izquierda), con y sin regeneración (derecha). (rojo sin regeneración), (verde con regeneración parcial) y (azul con regeneración completa de 3 MW). Fuente: Siemens AG .....	47
Fig. 5 Esquema del equipamiento eléctrico de la prensa, con el sistema completo de volantes de inercia. Estación trasformadora. Fuente: Siemens AG.....	47
Fig. 6 Estudio de la energía suministrada durante una jornada, en una estación de tren, con acumulador cinético de 3 MW y descargas de 10 minutos, sobre una instalación con consumo máximo de 8 MVA. Fuente: UPC Commons “Power boosting for railway power systems T. Cantero Gubert, 2013.....	49
Fig. 7 Diseño de un acumulador cinético de 3ª generación de energía eléctrica. Fuente: Red Eléctrica de España 2014. ....	52
Fig. 8 Acumulador cinético de energía eléctrica, llaves en mano, en armario eléctrico std comercial, 300 kW, 400-520 V. Fuente: “Celenix-VYCON” .....	53
Fig. 9: Curva de Disparo de un interruptor Magnetotérmico en instalación terrestre (Transformador). Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).....	58
Fig. 10 Circuito Equivalente simple de una batería Pb-ácido y circuito con resistencia paralelo Rp. Fuente: Propia. ....	63
Fig. 11 Máxima Tensión y Corriente de una batería Pb-Ácido. Fuente: Propia. ....	64
Fig. 12: Máxima Potencia de una batería Pb-Ácido. Fuente: Propia. ....	65
Fig. 13: Determinación del MPPT en función de la radiación solar. Fuente: Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications’, <i>IEEE Transactions on Industrial Electronics</i> .....	74
Fig. 14: Máquina rotativa de corriente continua con un par de polos, con devanado de excitación independiente. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias) y Propia.....	76
Fig. 15: Circuito equivalente de Dinamo con devanado de excitación. Fuente Propia.....	77

Fig. 16: Dinamo con un par de polos excitada con imanes permanentes. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias) y Propia.....79

Fig. 17: Circuito Equivalente dinamo con imanes permanentes, cargas. Fuente: Propia. ....80

Fig. 18: Excitación tipo Independiente, Dinamo. Característica externa. Fuente: (Sancho, 2021),.81

Fig. 19: Excitación tipo serie, Dinamo. Fuente: (Sancho, 2021), .....82

Fig. 20: Excitación tipo Shunt o Paralelo, Dinamo. Fuente: (Sancho, 2021), .....82

Fig. 21: Comparativa 3 excitaciones, Dinamo. Fuente: (Sancho, 2021),.....83

Fig. 22 Circuito equivalente de la corriente trifásica senoidal simétrica. Fuente: Propia.....87

Fig. 23:Circuito equivalente de un alternador síncrono. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias). .....87

Fig. 24:Circuito equivalente, exacto, de una máquina rotativa de inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias). ....89

Fig. 25:Circuito Equivalente aproximado, Motor de Inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias). .....90

Fig. 26: Sección transversal de rotores de alternador síncrono trifásico de polos salientes, 2 pares de polos a 50 Hz, velocidad de sincronismo 1500 rpm. Fuente: Fundamentos de Ingeniería Electrica,Universidad de la Laguna, Departamento de Ingeniería industrial .....94

Fig. 27: Diagrama fasorial de tensiones de una máquina síncrona trabajando como Motor. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias) .....95

Fig. 59: Grupos Electrógenos y Motores Eléctricos de inducción, utilizados en esta Tesis. Fuente: Propia .....**¡Error! Marcador no definido.**

Fig. 28: Excitación independiente de una maquina síncrona, alternador. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....99

Fig. 29: Excitación “sin escobillas” de una maquina síncrona, alternador. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....99

Fig. 30: Autoexcitación de una máquina síncrona, alternador. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....100

Fig. 31: Máquina Síncrona Trifásica con carga resistiva. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....102

Fig. 32: Máquina Síncrona trifásica con carga inductiva. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....103

Fig. 33: Variación de la saturación sobre el efecto de una misma f.m.m. sobre distintas f.m.m. de excitación. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).....104

Fig. 34: Tensión resultante en el interruptor de acoplamiento abierto, de una máquina con la red teniendo diferentes frecuencias. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....106

Fig. 35: Sincronoscopio de tres lámparas. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....107

Fig. 36: Disposición de las lámparas. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....108

Fig. 37 Conexiones para el acoplamiento en paralelo con sincronoscopio. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....108

Fig. 38: Alternador Síncrono, límites de Operación. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).....114

Fig. 39 Corrientes de corto circuito brusco de un alternador trifásico. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....116

Fig. 40 Oscilograma de la corriente simétrica de c.c. brusco. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).....117

Fig. 41: Símil hidráulico del balance de energías. Motor de inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias). .....120

Fig. 42: Pérdidas en el hierro y mecánicas, ensayo en vacío de un Motor de Inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991).....122

Fig. 43: Perdidas en el hierro y mecánicas en función del cuadrado de la tensión de alimentación. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991) .....122

Fig. 44: Curva de Caída de Tensión de un alternador síncrono, en función de la corriente de carga que circula por él. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....125

Fig. 45: Curva Tensión en Bornes-Corriente de carga y Curva Corriente de excitación-Corriente de carga, en maquina síncrona. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....126

Fig. 46: Intensidad de excitación-tiempo, maquina síncrona en cortocircuito. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). .....126



**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Fig. 47: Curva Par - Velocidad a diferentes frecuencias. Fuente: Tecnic suport.com .....	128
Fig. 48: Hueco de tensión asimétrico en red de 6 kV. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).....	130
Fig. 49: Embarcaciones “RAS” (PR 600) izquierda y “LADY” (SEARAY 6,5 m eslora) derecha. Fuente: Bolao i Cano, B. and Bosch-Tous, R. (2018) Aportacions a la Motorització elèctrica híbrida de l'embarcació LADY/ UPC Commons. ....	136
Fig. 50: Motor Tesla sumergible con hélice, embarcación “RAS” (PR600). Fuente: Bolao i Cano, B. and Bosch-Tous, R. (2018) Aportacions a la Motorització elèctrica híbrida de l'embarcació LADY/ UPC Commons. ....	137
Fig. 51: Arranque con GE HONDA comercial 6,4 kW / 6,5 kVA, $\cos\phi=1$ y con GE RAS HONDA Gasolina 4,6 kW / 8,5 kVA, $\cos\phi=0,5$ (Grupo electrógeno a medida, con una talla menos de máquina térmica y una más de Alternador, respecto al anterior grupo comercial de referencia. Fuente: Propia. ....	142
Fig. 52: Punto de Equilibrio de Par (verde) e intensidad (azul), motor de inducción con fuente infinita (línea continua) y con grupo electrógeno (línea discontinua), con Par resistente tipo hélice en régimen (rojo). Puntos de Equilibrio (A) (A') y (A'') función del tipo de ola. Fuente: Propia.....	143
Fig. 53 Par (verde) e Intensidad (azul), Motor Eléctrico de inducción, con la curva de Carga de Hélice (rojo) en régimen estable, alimentación por grupo electrógeno (trazo discontinuo), Punto de Equilibrio (A), Punto Crítico (C). Fuente: Propia.....	144
Fig. 54: Zoom de Par (verde) e Intensidad Arranque Motor Eléctrico de inducción (azul) con la curva de Carga de Hélice en régimen de sobrecarga, alimentación por grupo electrógeno (curvas a trazos). Límite de Carga (D). Fuente: Propia.....	145
Fig. 55: Par (verde) Intensidad Motor Eléctrico de inducción (azul trazo continuo) con la curva de Carga de Hélice en régimen de sobrecarga (rojo grueso) y bajando ola (rojo a trazos), alimentación fuente infinita. Subida Ola (B), Bajada Ola (E). Fuente: Propia.....	145
Fig. 56: Armario eléctrico con grupo de Condensadores, montado en el cuerpo izquierdo. Fuente: Propia. ....	149
Fig. 57: Esquema de un acumulador cinético de 3ª generación. Fuente: REE.....	153
Fig. 58: Registros de Intensidad de diferentes arranques del motor Novat 4 kW, sobre la curva de disparo de un Magnetotérmico. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias). ....	158
Fig. 60: Esquema eléctrico del sistema (AVR), de los alternadores HONDA. Fuente: HONDA .	164

Fig. 61: Grupo electrógeno $\cos\phi=1$ , HONDA 6,4 kW-6,5 kVA (conjunto maquina térmica-alternador), comercial ECMT 6500 13.0. Fuente: Propia .....	164
Fig. 62: Grupo electrógeno $\cos\phi=0,5$ , HONDA 4,6 kW- 8,5 kVA (conjunto máquina térmica alternador), RAS. Fuente: Propia .....	165
Fig. 59: Grupos Electrógenos y Motores Eléctricos de inducción, utilizados en esta Tesis. Fuente: Propia .....	169
Fig. 63 Convertidor de Frecuencia (VSD) de la serie <i>Unidrive</i> . Fuente: Propia .....	172
Fig. 64: Diagrama de bloques de un Sistema Regenerativo con volante de inercia. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” y Propia. ....	172
Fig. 65: Diagrama de Fasores V e I, sistema regenerativo. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	173
Fig. 66: Pack Condensadores del sistema Regenerativo. Fuente: ““ <i>Control Techniques</i> ” .....	176
Fig. 67: Esquema Eléctrico de Potencia del (VSD)” Regen”. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	177
Fig. 68: Esquema Eléctrico de potencia del (VSD) “Motoring” con el volante de inercia del sistema (ACEE). Fuente:” <i>Control Techniques</i> ” .....	178
Fig. 69: Terminales de Maniobra del sistema Regenerativo. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	180
Fig. 70: Estructura metálica de la bancada, Presentación del Motor y Conjunto acabado. Fuente: Propia .....	182
Fig. 71: Presentación y Montaje del volante de inercia. Fuente: Propia.....	184
Fig. 72: Volante de Inercia. Fuente: Propia .....	185
Fig. 73: Montaje del Conjunto. Fuente: Propia.....	185
Fig. 74: Detalles Constructivos Sistema (ACEE), vista frontal. Fuente: Propia.....	188
Fig. 75: Detalles Constructivos Sistema (ACEE), vista lateral y posterior. Fuente: Propia .....	189
Fig. 76: Versión de Software utilizada de “CT Connect”. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	194
Fig. 77: Pantalla principal de Inicio de “ <i>CT Connect</i> ” Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	194
Fig. 78: Muestra de ayuda en “CT Connect” Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	195
Fig. 79: Menú 00, “ <i>CT Connect</i> ”. Fuente: “ <i>ControlTechniques</i> ” .....	196
Fig. 80: Versión de Software “ <i>CT Scope</i> ”. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	197
Fig. 81: Muestra de un registro de velocidad (verde) y potencia (azul) “ <i>CT Scope</i> ”. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” y Propia.....	197
Fig. 82: Versión de “MCS”. Fuente: “ <i>Control Techniques</i> ” .....	198

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

Fig. 83: Muestra de “MCS”, Programa Freewheeling. Fuente: "Control Techniques" .....	199
Fig. 84 Parámetros de actualización rápida. Fuente: Propia .....	199
Fig. 85 Listado de Variables Globales. Fuente: "Control Techniques" .....	200
Fig. 86 Pantalla del Programa Clock. Fuente: "Control Techniques" .....	201
Fig. 87 Pantalla del Programa Freewheeling. Fuente: "Control Techniques" .....	201
Fig. 88 Panel de Transductores, Shunts, Trafos Tensión e Intensidad. Fuente: Propia .....	203
Fig. 89: Variables principales a registrar, durante el arranque directo en vacío, del propulsor ABB 3kW, alimentado de GE RAS 4,6 kW/8,5 kVA, $\cos\phi=0,5$ . Fuente: Propia .....	205
Fig. 90: Esquema de conexión y maniobra del sistema (ACEE) conectado a red de potencia infinita. Fuente: Propia .....	206
Fig. 91: Arranque del Propulsor Novat con red de potencia infinita, Tensión (azul). Fuente: Propia. ....	207
Fig. 92: Esquema de conexión y maniobra del sistema (ACEE) conectado a un grupo electrógeno HONDA 6,4 kW-6,5 kVA, $\cos\phi=1$ . Fuente: Propia .....	208
Fig. 93: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA 6,4 kW/6,5 kVA, $\cos\phi=1$ , alimentando el arranque directo, en vacío del propulsor Novat. Profundidad del hueco de tensión del 60% y duración de 1.520 ms. Fuente: Propia .....	209
Fig. 94: Calado de Máquina térmica del GE HONDA $\cos\phi=1$ , 6,4 kW/6,5 kVA, en el arranque directo, en vacío del Propulsor Novat de 4 kW. Fuente: Propia .....	210
Fig. 95: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA $\cos\phi=1$ , 6,4 kW/6,5 kVA frente al arranque directo, en vacío del propulsor ABB, Profundidad del hueco de tensión del 10% y duración de 570 ms. Fuente: Propia .....	211
Fig. 96: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA $\cos\phi=1$ , 6,4 kW/6,5 kW, frente al arranque directo, en vacío del propulsor Ventilador ABB, Profundidad del hueco de tensión del 18% y duración de 610 ms. Fuente: Propia .....	212
Fig. 97: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA 6,4 kW/6,5 kVA, frente al arranque directo, en vacío del Propulsor ABB +Propulsor Ventilador ABB en paralelo, Profundidad del hueco de tensión del 29% y duración de 1.000 ms. Fuente: Propia .....	213
Fig. 98: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo electrógeno RAS $\cos\phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA, alimentando al arranque directo, en vacío del propulsor Novat, Profundidad del hueco de tensión del 50% y duración de 820 ms. Fuente: Propia .....	215

Fig. 99: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo RAS  $\cos \phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA frente al arranque directo, en vacío del propulsor ABB, Profundidad del hueco de tensión del 18% y duración de 220 ms. Fuente: Propia .....216

Fig. 100: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo RAS  $\cos \phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA, frente al arranque directo, en vacío del propulsor Ventilador ABB. Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (20%/350 ms vs 18%/610 ms) Fuente: Propia .....217

Fig. 101: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo RAS  $\cos \phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA, frente al arranque directo, en vacío del propulsor ABB + propulsor Ventilador ABB, en paralelo, Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (31%/860 ms vs 29%/1.000 ms). Fuente: Propia .....218

Fig. 102: Arranque directo propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, variación Intensidad de Excitación y propulsor, Bus DC y Tensión de red, con y sin el sistema (ACEE). Fuente: Propia .....220

Fig. 103: Arranque directo, en vacío, del propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, comparativa Corriente propulsor y Corriente Excitación Alternador. Fuente: Propia .....220

Fig. 104: Arranque directo, en vacío del propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, tiempo de recuperación del alternador CON y SIN sistema (ACEE). Fuente: Propia .....221

Fig. 105: Arranque directo, en vacío del propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, corrientes de excitación, CON y SIN sistema (ACEE) Fuente: Propia .....221

Fig. 106: Sensor de Desplazamiento para medir carrera del carburador. Fuente: Propia .....222

Fig. 107: Montaje para registro del desplazamiento de la corredera de combustible, en grupo GE RAS. Fuente: Propia .....223

Fig. 108: Calibración resistencia lineal de posición. Fuente: Propia .....223

Fig. 109: Fuente DC digital controlada. Fuente: Amazon .....224

Fig. 110: Primeros registros de la señal de la resistencia lineal del carburador. Fuente: Propia ...224

Fig. 111 Registro de señal de la variación de resistencia lineal-corredera del carburador. Fuente: Propia. ....225

Fig. 112: Registro de la evolución del recorrido carburador y del tiempo de reacción de la Intensidad de excitación  $I_{exc}$ . Fuente: Propia .....225

Fig. 113: Registros de la respuesta temporal, de Carburador e  $I_{exc}$  del grupo electrógeno RAS, ante el arranque en vacío del propulsor Novat. Fuente: Propia .....226

Fig. 114: Tiempos de reacción de la intensidad de excitación 9,5 ms.y del carburador 63 ms., de un alternador síncrono RAS (4,6 kW / 8,5 kVA) alimentando el arranque directo en vacío, de un motor eléctrico de inducción de 4 kW. Fuente: Propia.....	226
Fig. 115: Disparo del Bus DC al sobrepasar los 830 V. Fuente: Propia.....	229
Fig. 116: Caída de Tensión >53% y de Frecuencia 50/33 Hz del grupo RAS y (ACEE) conectado, en el arranque en vacío, del motor Novat de 4 kW. Fuente: Propia.....	230
Fig. 117: Registro de Tensión del grupo RAS, Corriente de arranque en vacío del propulsor Novat y primeras Descargas regenerativas del acumulador cinético (ACEE). Fuente: Propia .....	232
Fig. 118: Tiempo vs Profundidad de regeneración, arranque en vacío del propulsor ABB con ventilador alimentado por GE RAS. Fuente: Propia .....	234
Fig. 119: Tiempo vs Profundidad de Regeneración, arranque en vacío del propulsor ABB con ventilador alimentado por red de potencia infinita. Fuente: Propia .....	234
Fig. 120: Registro de contenido de armónicos de la Tensión de la Red de potencia infinita. Fuente: Propia .....	235
Fig. 121: Registro de contenido de armónicos, de la tensión en vacío del alternador Honda del grupo Honda. Fuente: Propia.....	236
Fig. 122: Registro de contenido de armónicos de la Tensión en vacío del Alternador TEKEL, Grupo RAS. Fuente: Propia.....	237
Fig. 123: Comparativa de contenido de armónicos de la tensión de red, estando el sistema (ACEE) desconectado (izquierda) y conectado (derecha). Fuente: Propia .....	239
Fig. 124: Comparación de la forma de onda de tensión, con convertidor de frecuencia de 6 pulsos, std. y de 12 pulsos, frente activo: Fuente: Emotron AFE.....	240
Fig. 125: Caída de la tensión del alternador, en el arranque en vacío del propulsor Novat desde el GE RAS, Hueco de tensión: profundidad: 50%, duración: 820 ms. Fuente: Propia.....	242
Fig. 126: Registro de Variación Intensidad del propulsor-carga y Caída de Tensión en el arranque directo en vacío, del propulsor Novat desde el grupo RAS $\cos\phi=0,5$ . Fuente: Propia.....	244
Fig. 127: Registro de Variación de la Frecuencia del alternador en el arranque en vacío del propulsor Novat alimentado del grupo RAS. Fuente: Propia.....	245
Fig. 128 Registro de Descarga Regenerativa, por incremento del nivel de Bus DC, caída de tensión y retraso de la descarga regenerativa, en relación al arranque de la carga. Fuente: Propia.....	249

Fig. 129: Variación del nivel de Bus DC (energía a descargar), Tensión de alternador e Intensidad de la carga, en un arranque en vacío del propulsor ABB + Ventilador ABB en paralelo, desde el grupo RAS y con un control anticipativo de 500 ms. Fuente: Propia .....	251
Fig. 130: Gráfico Patrón, para futuros registros de ensayos de arranque directo en vacío, anticipativos. Fuente: Propia .....	253
Fig. 131: Registro de osciloscopio, de la regeneración realizada con programa de Plc y corte a la recuperación de la tensión del alternador. Fuente: Propia.....	255
Fig. 132: Lista de variables globales del Control Anticipativo. Fuente: Propia .....	256
Fig. 133: Rutina “Clock” del Control Anticipativo. Fuente: Propia .....	257
Fig. 134: Rutina “Freewheeling” del Control Anticipativo. Fuente: Propia .....	258
Fig. 135: Parámetros de acceso rápido del Control Anticipativo. Fuente: Propia .....	259
Fig. 136: Dependencia del Nivel de Bus DC, tiempo de recuperación y potencia instantánea absorbida vs. % par de frenado. Fuente: Propia.....	262
Fig. 137: Imagen de registro de descarga de energía del volante de inercia y recuperación del sistema (ACEE). CT Scope. Fuente: Propia .....	264
Fig. 138: Potencia generada kW vs. Profundidad de Regeneración rpm. Fuente: Propia.....	265
Fig. 139: Gráfico Tiempo de Regeneración vs. % par de frenado vs. profundidad de la regeneración. Fuente: Propia.....	265
Fig. 140: Duración Regeneración vs de Profundidad de Regeneración. Fuente: Propia .....	266
Fig. 141: Influencia en la Frecuencia de red, de la duración de la Regeneración. Fuente: Propia.	268
Fig. 142: Registro de Arranque directo en vacío, del propulsor Novat desde grupo electrógeno RAS, con sistema (ACEE) anticipativo 600 ms. Fuente: Propia .....	269
Fig. 143: Retardo de actuación del sistema (AVR) en un alternador síncrono 100 kVA. Fuente: Ricard Bosch-Tous, “Cargas dinámicas en Grupos Electrógenos de Emergencia.....	270
Fig. 144: Arranque directo en vacío, del propulsor Novat de 4 kW, desde una fuente de potencia infinita (izquierda), sin alteración de tensión ni frecuencia y con grupo electrógeno cos $\phi=1$ , HONDA 6,4 kW / 6,5 kVA (derecha), sufriendo una calada del motor térmico, o “Blackout”. Tensión en azul, Corriente en rojo. Fuente: Propia .....	275
Fig. 145: Comparativa de la Tensión y Corriente del alternador, en un GE cos $\phi=1$ HONDA comercial ( $I_{cc}=30$ A) , de otro sobredimensionado cos $\phi=0,5$ ( $I_{cc}=37$ A), y del mismo con apoyo	

adicional del sistema ACEE, en el arranque directo de un motor de inducción de 4 kW. Fuente: Propia .....276

Fig. 146 Comparativa de la Tensión y Corriente del alternador, en un GE  $\cos \phi=1$  HONDA comercial (Icc=30 A) y del mismo con apoyo adicional del sistema ACEE, en el arranque directo de un motor de inducción de 4 kW. Fuente: Propia .....277

Fig. 147: Puntos de medida del análisis espectral.Fuente: Propia. ....297

Fig. 148: Registro Espectral a 2 kHz y  $\Delta f$  10 Hz, mediante FFT. Fuente: Propia. ....299

Fig. 149: Registro Espectral con  $\Delta f$ : 1 Hz (ACEE) y Carga conectados. Fuente: Propia.....300

Fig. 150: Registro Espectral de muy baja frecuencia, hasta 60 Hz. Motor Novat usado como carga y girando en vacío. Fuente: Propia.....301

Fig. 151 :Señal de red de los alternadores en isla.Fuente:Propia. ....302

Fig. 152: Análisis Espectral Alta frecuencia señal. Fuente: Propia. ....302

Fig. 153: Tensión en bornes del alternador. Estator con sus Ranuras. Fuente: Circutor. <http://circutor.es/es/documentacion-es/articulos/3113-armonicos-de-ranura-en-sistemas-de-generacion-electrica> .....303

Fig. 154: Maniobra de contactores y panel de maniobra. Fuente: Propia.....311

Fig. 155 Esquema de Potencia de Convertidores de Frecuencia, lado “Regen”. Fuente: Propia...312

Fig. 156: Esquema de Potencia de Convertidores de Frecuencia, lado “Motoring”. Fuente: Propia .....313

Fig. 157: Chasis del sistema (ACEE). Escala 1:10. Fuente: Propia.....314

Fig. 158: Placa base soporte de motor y apartamenta. Escala 1:10. Fuente: Propia .....315

Fig. 159: Placas de madera inferior y superior. Escala :10. Fuente: Propia.....315

Fig. 160: Magnetotermicos de puesta en marcha del (ACEE). Fuente: Propia.....316

Fig. 161 : Interruptores de Habilidadación y Reset del (ACEE). Fuente: Propia.....316

Fig. 160: Magnetotermicos de puesta en marcha del (ACEE). Fuente: Propia;**Error! Marcador no definido.**

Fig. 162: Red de potencia infinita y VSD monofásico. Tres Cargas diferentes, comparativa. Fuente: Propia .....320

Fig. 163: Grupo electrógenos RAS (4,6 kW/8,5 kVA,  $\cos\phi=0,5$ ) y VSD monofásico. Tres Cargas diferentes, comparativa. Fuente: Propia .....321



Fig. 164: Grupo Honda inverter (2,2 kW/1,6 kVA) y (VSD) monofásico. Tres Cargas diferentes, comparativa. Fuente: Propia.....	322
Fig. 165: Diagrama de bloques de un Sistema Regenerativo (ACEE), alimentando dos convertidores de frecuencia desde su Bus DC. Fuente: “Control Techniques” y Propia.....	325
Fig. 166: Montaje de dos convertidores de frecuencia marca Omron de 11/15 kW, alimentados del bus DC del sistema regenerativo (ACEE). Fuente: Propia .....	325
Fig. 167: Registro de la variación del Bus DC, en el arranque en vacío, del propulsor Novat 4 kW, regulado por convertidor de frecuencia “Omron” 11/15 kW (2 s), alimentado por el Bus DC del sistema (ACEE), que a su vez esta alimentado de red de potencia infinita. Fuente : Propia .....	326
Fig. 168: Registro de la variación del Bus DC, en el arranque del propulsor Novat, regulado por convertidor de frecuencia Omron 11/15 kW (2 s), alimentado por el Bus DC del sistema (ACEE) que a su vez está alimentado del GE RAS. Fuente: Propia .....	326
Fig. 169: Vehículo Electro Solar “Despertaferro”. Fuente: Ricard Bosch-Tous .....	330



## VI. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Algunos casos de “Power Blackout” oficialmente reportados por “CIAIM” 2009-2019...	45
Tabla 2 Ahorros con el sistema Regenerativo.....	48
Tabla 3 Aplicaciones de Acumulador cinético, estadística USA, base de datos DOE “Global Energy Storage” 2020.....	54
Tabla 4 Alternador en modo isla y conectado a una red infinita. Parámetros que gobiernan los diferentes controladores. ....	108
Tabla 5 Límites de Variación de Tensión-Frecuencia y Armónicos según las SSCC. ....	134
Tabla 6 Grupos electrógenos con los que se han realizado las pruebas de laboratorio.....	156
Tabla 7 Motores eléctricos de inducción con los que se han realizado las pruebas de laboratorio. ....	157
Tabla 8 Duración e intensidad del transitorio simétrico y asimétrico de arranque del motor Novat con diversas fuentes de energía.....	159
Tabla 9 Listado de los Grupos electrógenos a 50 Hz, utilizados en este trabajo. ....	163
Tabla 10 Grupo electrógeno HONDA comercial $\cos \phi = 1$ , 6,4 kW-6,5 kVA (conjunto maquina térmica- alternador).....	164
Tabla 11 Grupo electrógeno $\cos \phi = 0,5$ , HONDA RAS especial 4,6 kW-8,5 kVA (conjunto máquina térmica-alternador).....	165
Tabla 12 Grupo de generación 15 kVA $\cos \phi = 1$ Estribor, con Excitatriz y AVR manual. Características y Grafico de arranque directo en vacío del motor Novat.....	166
Tabla 13 Grupo de generación 15 kVA $\cos \phi = 1$ Babor, con Excitatriz y AVR electrónico autoalimentado, Características y Grafico de arranque directo en vacío del motor Novat. ....	167
Tabla 14 Datos Técnicos de los Convertidores de Frecuencia utilizados, 05400270, .....	173
Tabla 15 Varistores de protección.....	175
Tabla 16 Ficha técnica GE Honda. $\cos \phi = 1$ .....	209
Tabla 17 Ficha técnica GE Honda. $\cos \phi = 1$ .....	211
Tabla 18 Ficha técnica GE Honda. $\cos \phi = 1$ .....	212
Tabla 19 Ficha técnica GE Honda $\cos \phi = 1$ .....	213
Tabla 20 Ficha técnica GE RAS. $\cos \phi = 0,5$ .....	215

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Tabla 21 Ficha técnica GE RAS cos $\phi=0,5$ .....	216
Tabla 22 Ficha técnica GE RAS cos $\phi=0,5$ .....	217
Tabla 23 Ficha técnica GE RAS cos $\phi=0,5$ .....	218
Tabla 24 Calibración sonda lineal de posición. ....	223
Tabla 25 Cuadro resumen de la caracterización de los huecos de tensión producidos por el arranque directo en vacío, de los propulsores de inducción alimentados desde GE HONDA y RAS. ....	227
Tabla 26 Datos arranque directo en vacío, propulsor Novat con el grupo electrógeno HONDA 6,4 kW- 6,5 kVA, cos $\phi=1$ conectado, para gráfico Fig. 125, con 10% de par de frenado vs. tiempo de recuperación del sistema ms.....	261
Tabla 27 Datos arranque directo en vacío, propulsor Novat con el grupo electrógeno HONDA 6,4 kW-6,5 kVA, cos $\phi=1$ , para gráfico Fig. 125, con 19% de par de frenado vs. tiempo de recuperación del sistema ms. ....	262
Tabla 28 Datos Profundidad de Regeneración vs Duración Descarga.....	266
Tabla 29 Ensayos de arranques de motor Novat alimentado por grupo RAS, SIN (ACEE) y CON (ACEE) con 20% de par de frenado, para optimizar el tiempo de anticipación de la descarga y su influencia en la mejora del hueco de tensión. ....	271
Tabla 30 Mejoras que aporta el sistema (ACEE) a los huecos de tensión del alternador, provocados por el arranque directo y en vacío, de un motor de inducción 4 kW alimentado de GE, cos $\phi =0,5$ , RAS 4,6 kW-8,5 KVA.....	273
Tabla 31. Huecos de tensión provocados por el arranque directo en vacío del motor Novat de 4 kW, alimentado de diversos grupos electrógenos y con la intervención del sistema (ACEE).....	277
Tabla 32 Corrientes de arranque de tres tipos de motores carga, con tres fuentes de alimentación diferentes. ....	323
Tabla 33 Valoración Económica.Materiales y Costes de Ingeniería. ....	335

## VII. ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación ( 1 ) Cálculo de la Tensión en bornes $U_b$ en una batería de Pb-Acido.....	63
Ecuación ( 2 ) Cálculo de la Corriente de Cortocircuito de una Batería Pb-Acido.....	64
Ecuación ( 3 ) Determinación de $E$ en una Batería Pb-Acido.....	65
Ecuación ( 4 ) Fuerza electromotriz $E$ y Balance de tensiones de una máquina de .....	77
Ecuación ( 5 ) Par de una máquina de corriente continua, dinamo.....	78
Ecuación ( 6 ) Flujo magnético de una máquina de corriente continua.....	78
Ecuación ( 7 ) Par de una máquina de corriente continua, dinamo.....	78
Ecuación ( 8 ) F.E.M. de una dinamo con imanes permanentes.....	79
Ecuación ( 9 ) Tensión en bornes de una dinamo .....	79
Ecuación ( 10 ) Par transmitido por una dinamo, excitación de imanes permanentes.....	79
Ecuación ( 11 ) Par Dinamo con excitación serie.....	82
Ecuación ( 12 ) Curva característica excitación paralelo.....	83
Ecuación ( 13 ) Velocidad y Frecuencia máquina Síncrona en rpm.....	86
Ecuación ( 14 ) Velocidad y Frecuencia máquina Síncrona en radianes.....	86
Ecuación ( 15 ) Suma de corrientes senoidales por fase en un circuito equivalente trifásico simétrico. .....	87
Ecuación ( 16 ) Potencia útil Motor de inducción.....	90
Ecuación ( 17 ) Velocidad Síncrona $n_s$ rpm.....	93
Ecuación ( 18 ) Reacción de inducido resultante como resta de la de excitación y la de inducido. .....	105
Ecuación ( 19 ) Frecuencia de la envolvente de la tensión que aparece en el interruptor abierto de acoplamiento entre dos máquinas síncronas de diferentes frecuencias.....	106
Ecuación ( 20 ) Potencia absorbida de la red. Motor de inducción.....	119
Ecuación ( 21 ) Pérdidas por calor en el cobre del primario.....	119
Ecuación ( 22 ) Potencia disponible para crear el campo magnético giratorio.....	119
Ecuación ( 23 ) Potencia electromagnética transmitida por inducción al secundario o rotor.....	119
Ecuación ( 24 ) Potencia mecánica interna.....	119

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Ecuación ( 25 ) Pérdida de Potencia por efecto Joule en el rotor.....	119
Ecuación ( 26 ) Potencia Mecánica interna.....	120
Ecuación ( 27 ) Potencia útil. Motor de inducción.....	120
Ecuación ( 28 ) Potencia absorbida en el ensayo de vacío de un motor de inducción. ....	121
Ecuación ( 29 ) Pérdidas en el hierro y mecánicas de un motor de inducción.....	121
Ecuación (30) Ecuaciones de la rama paralelo del circuito equivalente del motor de inducción. .	123
Ecuación ( 31 ) Ecuaciones de la rama serie del circuito equivalente Thévenin motor de inducción. .....	123
Ecuación ( 32 ) $X_1, X'_2$ de la rama serie del circuito equivalente Thévenin motor de inducción. .	123
Ecuación ( 33 ) Capacitancia .....	147
Ecuación ( 34 ) Capacitancia total .....	148
Ecuación ( 35 ) Resonancia de una batería de condensadores. ....	148
Ecuación ( 36 ) Resonancia en Hz de una batería de condensadores.....	148
Ecuación ( 37 ) Tiempo descarga s. de un acumulador cinético. ....	151
Ecuación ( 38 ) Eficiencia de un acumulador cinético.....	151
Ecuación ( 39 ) Autonomía de un acumulador cinético. ....	151
Ecuación ( 40 ) Energía Cinética acumulada en un acumulador cinético. ....	152
Ecuación ( 41 ) Densidad de energía específica almacenable en un acumulador cinético.....	152
Ecuación ( 42 ) Momento de Inercia de una masa puntual girando con radio r.....	152
Ecuación ( 43 ) Cálculo de la Inercia del Volante de Inercia.....	186
Ecuación ( 44 ) Velocidad angular de sincronismo en Rad/s.....	186
Ecuación ( 45 ) Energía acumulada a 1500 rpm. ....	186
Ecuación ( 46 ) Orden del Armónico. ....	303
Ecuación ( 47 ) Cálculo del armónico.....	303

## VIII. ABREVIATURAS-ACRÓNIMOS

- **(ACEE)**. Acumulador Cinético de Energía Eléctrica.
- **AVR**. Regulador automático de tensión de un alternador síncrono. “*Automatic Voltage Regulation*”.
- **Background**. Tarea del programa de PLC, es una tarea lenta que se ejecuta continuamente.
- **Bus DC**. Nivel de tensión en el enlace interno, de corriente continua en un Convertidor de Frecuencia.
- **CIAIM**. Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes Marítimos.
- **Clock**. Código principal del programa, que se ejecuta de forma secuencial.
- **CT Connect**. Software del fabricante “Control Techniques” para programar sus convertidores de frecuencia (VSD).
- **CT Scope**. Software del fabricante “Control Techniques” para registrar en osciloscopio de 8 canales digital, los parámetros de sus convertidores de frecuencia (VSD).
- **DEE**. Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- **Fast Access Parameter List**. Lista de parámetros de acceso rápido.
- **Freewheeling**. Tarea de inicialización de variables.
- **GE/**
- **GENSET**. Grupo electrógeno. Grupo de generación de energía eléctrica.
- **GVL (Global Variable List)**. Lista de variables globales.
- **IGBT**. Transistor bipolar de puerta aislada electrónico.
- **MCS**. Software del fabricante “Control Techniques” para desarrollar los programas de Plc interno de sus convertidores de frecuencia.
- **Motoring**. Convertidor de frecuencia responsable del control del volante de inercia.
- **Plc**. Control Lógico Programable. “*Programmable logic control*”.
- **Power Blackout**. Caída de planta eléctrica a bordo, por calado del motor térmico.
- **Propulsor**. En nuestro caso: Motor eléctrico de inducción, de rotor en jaula de ardilla.
- **Regen**. Convertidor de frecuencia responsable de la devolución sincronizada de energía a la red.
- **THD**. Tasa de distorsión armónica. “*Total harmonic distortion*”
- **Unidrive**. Marca comercial de una serie de convertidores de frecuencia del fabricante “Control Techniques”.
- **UPS**. Fuente ininterrumpida de energía. “*Uninterrupted power supply*”
- **VDF**. Variador de frecuencia. Convertidor de Frecuencia. “*Variable drive Frequency*”.
- **VSD**. Convertidor de frecuencia. “*Variable Speed drive*”.




## IX. MOTIVACIÓN

Terminé la carrera de Ingeniería Naval, en la especialidad de “Arquitectura Naval” en 1976 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid.

Después de una primera experiencia en “Talleres Nuevo Vulcano” de Barcelona, donde ya había estado trabajando los veranos desde el tercer curso, entré a trabajar en la Empresa Nacional BAZAN de Cartagena mientras duró el servicio militar y posteriormente un año más, en cuyo periodo se construyeron allí las 3 “corbetas”: Descubierta, Príncipe Felipe e Infanta Elena. Dirigía el astillero en la parte técnica Joaquín Coello y fue un verdadero placer trabajar con él.

Participé en el equipo que llevó a cabo la transformación de los submarinos “Dafne”, eliminando parte de la cámara de torpedos para aumentar la habilitación y dejar el sistema de “cama caliente” que ya no era apropiado ni necesario.

Desde allí en 1978 regrese a Barcelona, mi ciudad natal, para trabajar en el Bureau Veritas SAF, al principio dedicado a las centrales nucleares de Asco II y Vandellós II. Al año aproximadamente ya inicié la actividad como Inspector Naval, en materiales para nuevas construcciones, tanto mecánicos como eléctricos en los laboratorios de los fabricantes, para certificaciones y homologaciones, con destino a buques bajo clasificación  , la cruz de malta del Bureau Veritas y en paralelo con el trabajo, inspecciones periódicas de buques en servicio de todo tipo, incluyendo la plataforma de extracción de crudo (Delta) en el Delta del Ebro.

En 1983 curse una formación empresarial en el Instituto de Estudios Superiores de Empresa (IESE) de Barcelona, en paralelo con el trabajo, la duración fue de 1 año y enfocado a desarrollar aptitudes de gestión empresarial, con el (PDD Programa de Desarrollo Directivo).

Desde 1986 mi enfoque profesional devino en Dirección de Negocios, siempre en Industria y en el sector de la automatización, gestionando la comercialización de motores, servo motores eléctricos, reductores y su regulación electrónica de potencia, así como dirigiendo al equipo técnico que realizaba su aplicación en la automatización de procesos industriales.

Las empresas fueron “Mavilor Motors SA” Barcelona (9 años) propiedad de “Infranor Inter AG” Suiza, y posteriormente “Control Techniques” (26 años), Gales, Reino Unido, que fue comprada por “Emerson Industrial Corp.” St Louis, USA en 1993 hasta el 2018, fecha en la cual lo adquirió la japonesa Nidec Corp. Kyoto, Japón.

Después de 26 años en “Control Techniques Iberia SA” como CEO de España, Portugal y la República de S. África y aunque he aceptado retrasar la jubilación 4 años más, finalmente decidí dar paso a savia nueva y quedar en un segundo plano como consultor temporal de la misma; lo que ocurrió el 2 de abril del 2019.

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Llegado a este punto, habiendo deseado regresar a mis inicios en la Universidad, por vocación de enseñar y compartir experiencias de 44 años de profesión, aprovechando la gran ventaja de que actualmente en la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC), hay la posibilidad de cursar el Doctorado, no dudé en hacer la preinscripción y matrícula e iniciar este trabajo de investigación.

Mi primer contacto fue el Dr. Jaime Rodrigo, quien me presentó varias alternativas.

Entre las diferentes alternativas, elegí la que tenía un contenido más tecnológico y donde veía que podía aportar más innovación, de las manos de un reconocido y prestigioso director, como el Dr. Ricard Bosch-Tous. Con él he reaprendido multitud de conceptos, que ya estaban olvidados y muchos de nuevos. (I.Elgerd, 1983) - (Aneke and Wang, 2016)

El tema de la tesis que decidimos finalmente, lo fue en base a los conocimientos que podíamos aportar y enfocado a problemáticas no resueltas, que han cuajado en el título: **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**



## X. OBJETO DEL ESTUDIO

Aplicar la tecnología de ahorro de energía de las servo prensas terrestres 100% eléctricas, a las plantas de generación eléctrica a bordo, para mejorar su comportamiento transitorio en la zona de prestaciones cercanas al cortocircuito, a fin de mantener constante la tensión en bornes de los alternadores síncronos, que generan la potencia eléctrica a bordo.(Cortes-Cherta, 1974)

A raíz del desarrollo e industrialización de la primera gran servo prensa en el mundo (2016-2017) 100% eléctrica, por parte del grupo japonés “Nidec Corp.”, Kyoto, Japón y concretamente la desarrollada por la empresa española ARISA, adquirida por Nidec Corp. La Rioja, se detectó la posibilidad de innovar, aplicando esta tecnología al mundo naval, donde la optimización y seguridad de funcionamiento de las plantas de generación de energía eléctrica, son uno de los principales objetivos de armadores y astilleros. (Siemens- AG, 2014) ,

Este desarrollo de la prensa, llevó implicada la necesidad de reducir la punta de energía consumida MW y concretamente el término de potencia, de la estación transformadora de energía eléctrica, entre un 50% y 70% aproximadamente, con los consiguientes ahorros en costes de la misma. Así mismo se logra la facilidad de poder montar este tipo de prensas en plantas industriales, sin necesidad de instalar un nuevo gran centro de transformación, evitando así también costes y los plazos dilatados de aprobación de las distribuidoras eléctricas y autoridades locales.

Concretamente la prensa, tiene un consumo nominal de 2000 kVA y un pico máximo de 3000 kVA.

El sistema de alimentación eléctrica del accionamiento de la prensa, se complementa con un sistema de acumulación cinético de energía eléctrica (ACEE), que incorpora motores de alta inercia *Flywheel* y otros acumuladores del tipo estático (baterías de condensadores). La energía necesaria para acelerar los motores par principales, es suministrada por la energía de estos sistemas cinéticos.(Lafoz *et al.*, 2014)(Mutarraf *et al.*, 2018)

Si bien la potencia de pico máxima es de  $\pm 3$  MW, utilizando los acumuladores cinéticos de energía eléctrica y un software de Plc, diseñado para esta aplicación, se consigue alisar la potencia a 650 kW RMS, siempre positiva, con los efectos beneficiosos de costes y en fatiga electromecánica de los elementos afectados. Las secciones de cables, su peso y consiguiente coste se reduce enormemente. Lo mismo cabe decir del transformador de entrada y de otros muchos elementos asociados como las protecciones eléctricas, etc.

La energía generada cuando los motores par principales, (motores de 750 rpm) desaceleran, se utiliza para cargar estos sistemas cinéticos y acumuladores estáticos. Por esta razón la fuente de alimentación, solo debe cubrir la energía de la prensa trabajando en vacío, incluyendo pérdidas mecánicas, eléctricas

y deformación plástica, sin la necesaria de energía adicional para la deformación elástica de la pieza, que se recupera en cada golpe.

En el caso de la prensa, la gran energía que se recupera en cada golpe de la misma, sugiere la de aplicación naval, pues también se tienen escenarios pulsantes y arranque de motores de inducción, que pueden llegar a consumir hasta 7 y 8 veces su corriente nominal  $I_N$ . En propulsión eléctrica de buques con mala mar, debido a la subida y bajada de la ola, se producen grandes variaciones de las corrientes absorbidas por los propulsores, que pueden asimilarse al caso de las prensas, aunque con ciclos más largos en el tiempo.

Los acumuladores cinéticos *Flywheel*, motores sin eje de salida de alta inercia, de 2000 rpm nominales, están continuamente oscilando entre 1200 rpm, momento de la descarga y 1800 rpm cuando se recuperan de ella. (Chen *et al.*, 2009)

Aunque las prensas y los buques son dos máquinas muy diferentes, el objeto de esta tesis es extraer lo mejor de ese mundo tecnológicamente tan avanzado, para optimizar el dimensionado y estabilidad de las plantas marinas de generación eléctrica, sobre todo en el caso de alimentar grandes motores con cargas cíclicas, como los de propulsión naval Diesel-eléctrica, en escenarios de meteorología adversa. (Rairán, Guerrero and Mateus, 2010; Radan *et al.*, 2016; Garrigosa García, 2017)

## XI. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Resolver las caídas de planta de generación eléctrica a bordo, mediante el empleo de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE), a fin de mantener siempre constante la tensión en bornes del alternador, aunque la corriente demandada sea netamente superior a la nominal, por un corto periodo de tiempo.

Los acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE) presentados, pueden ser una solución que aunque cara, es altamente eficiente, de fácil montaje y ubicación, escalable en potencia, con bajo mantenimiento y alta repetitividad.

Tradicionalmente la potencia motriz (máquina térmica primaria) en kW y la potencia aparente del alternador en kVA, se han diseñado para que tengan la misma magnitud ratio 1:1 ( $\cos \phi=1$ ), principalmente por razones de tradición, económicas y por criterios energéticos demasiado simplificados, al pensar exclusivamente en cargas resistivas. Esto origina grandes problemas de regulación y estabilidad de la planta de generación eléctrica, toda vez que las variaciones de la potencia reactiva e instantánea, solicitadas por la carga, pueden llegar a ser muy superiores a la nominal del alternador, durante los arranques de algunos motores eléctricos (Brunner, Werle and Evans, 2013). La regulación de la excitación del generador frente a esas variaciones de la carga, es todo un reto para la ingeniería, a fin de poder mantener la tensión de salida del alternador constante y especialmente en propulsión Diesel-eléctrica.

En ocasiones, se llega fácilmente a la conclusión de necesitar un generador sobredimensionado un 200%-300% respecto al Diesel que lo arrastra, para poder hacer frente a los transitorios solicitados por cargas de tipo motores de inducción. Mientras que el alternador síncrono, típicamente utilizado a bordo en grupos electrógenos trabajando en isla, puede dar hasta tres veces la corriente nominal, en condiciones de cortocircuito, un transformador electromagnético terrestre, llega fácilmente a veinte veces la corriente nominal (Oriol, B, Sainz, L, Córcoles and Suelves, 2002; Patel, 2011). Por eso en tierra los motores eléctricos al arrancar, provocan menos oscilación de la tensión que los alimenta, que a bordo.

Un motor parado se considera un cortocircuito para el alternador que lo alimenta, mientras el rotor está parado y hasta que adquiere una velocidad significativa, momento en el cual deja de consumir la energía de aceleración y la potencia reactiva Q necesaria para su arranque.

Esta tesis propone el uso de los acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE), para asegurar la estabilidad de las plantas de generación eléctrica a bordo.

Las plantas de generación eléctrica con (ACEE), se acercan al comportamiento transitorio de los transformadores terrestres, en las prestaciones de cortocircuito necesarias para el arranque de grandes motores eléctricos (Fox-Penner, 2005) (Say, 2003; San Martín *et al.*, 2017) (Zhou *et al.*, 2013).

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Las soluciones propuestas son imprescindibles para evitar las caídas de la planta de generación eléctrica, al arrancar bruscamente, motores de inducción de alta corriente de arranque, como pueden ser los propulsores transversales de proa.

## XII. ALCANCE

Este trabajo se basa en la experimentación, se inicia materializando un conjunto de grupos electrógenos trifásicos, para alimentar varios motores eléctricos de inducción, del orden de 4 kW, 400 V, 50 Hz, que permitan reproducir a escala, las casuísticas más severas de arranque de grandes motores eléctricos a bordo.

Por facilidad constructiva y de experimentación se ha centrado el estudio en el arranque en vacío de un motor de inducción, Novat de 4 kW, 400 V, consiguiendo hacer caer la planta experimental de laboratorio. Una vez reproducida en el laboratorio la casuística a estudiar y puestos a punto los sistemas de registro y medida, se ha construido en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de ingeniería eléctrica (DEE), un sistema de acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE). Añadido a los diferentes grupos electrógenos, ha permitido estudiar las mejoras de comportamiento del conjunto para el arranque del motor de inducción.

En base a la experiencia personal adquirida en “Control Techniques”, se opta por el diseño de esta firma, de un sistema electrónico regenerativo, según manual *Regen Design Guide*” part number: 0478-0366-04 Issue:4.

Se construye un chasis transportable a medida, se realiza el montaje mecánico y eléctrico del acumulador cinético de energía eléctrica, para posteriormente instalar el motor eléctrico de inducción y su volante de inercia tal como muestra en Fig. 1 y 2:



**Fig. 1 Chasis, Montaje del motor eléctrico de 9 kW, 400 V, 50 Hz y volante de inercia del prototipo de acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE) construido. Fuente: Propia.**

Este acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE), va equipado de un motor de inducción en montaje vertical IM, de 9 kW, 400 V, 50 Hz, que soporta con su eje un volante de inercia.

El armario eléctrico del sistema (ACEE), incluye dos convertidores de frecuencia digitales (VSD), programables para sistema regenerativo, de 11 kW (ciclo duro), todo ello a 400 V, 50 Hz. Estos convertidores de frecuencia, controlan al motor de alta inercia de 9 kW, asociado al volante y se han

utilizado también, para poder estudiar la alimentación con VSD, del motor propulsor de 4 kW. Incorpora además elementos de protección, medida y control.

Dado que los convertidores de frecuencia utilizados, disponen de una memoria interna de Plc, *Plc on board*, se decide utilizarla y así evitar elementos externos, tales como Plc, así como de su alimentación y cableado.



**Fig. 2 Fases de Montaje y Acabado del Prototipo (ACEE) construido. Fuente: Propia.**

En el documento se detallan las numerosas pruebas de arranques directos en vacío, de diversos motores de inducción de jaula de ardilla, simulando propulsores eléctricos de una embarcación. Se han alimentado desde diversos grupos electrógenos de generación eléctrica, con y sin el acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE). También se han introducido diversos programas de Plc, que han permitido el registro y grabación de ficheros *csv*, en osciloscopio digital, de alta velocidad de captación de datos (200 MHz), para posterior tratamiento en el procesador excel, su análisis y conclusiones.

Los trabajos de taller y laboratorio han sido realizados desde mayo 2019 hasta octubre 2022.

# 1 INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE LAS CAÍDAS DE PLANTA ELÉCTRICA.

## 1.1 CAÍDAS DE PLANTA ELÉCTRICA

La complejidad del fenómeno a estudiar dificulta su modelización teórica, pues además de las máquinas eléctricas reales implicadas y los motores térmicos que arrastran a los generadores de electricidad, existen gran cantidad de controladores de las diferentes magnitudes. (Patel, 2011)

Estos controladores abarcan muchas tecnologías, marcas y criterios de regulación, no siempre pensados para trabajar en la configuración ensayada.

A bordo suele ser habitual que los ingenieros navales, nos centremos en los rendimientos de las plantas de generación y su fiabilidad en carga, a velocidad de crucero.(Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

Este trabajo analiza estadísticamente los informes de las sociedades clasificadoras: ABS (ABS, 2022), Bureau Veritas, (Bureau Veritas, 2022), DNV (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, 2015) y Lloyd's (Lloyd's Register, 2014) y del organismo español Comisión de Investigación de accidentes e incidentes marítimos (CIAIM) entre otros, sobre las caídas de planta reportadas, para estudiar sus consecuencias que derivan en siniestros. Se estima que las caídas de plantas, que no acaban reportadas, por no generar grandes daños, no son un número despreciable.

El (CIAIM), órgano colegiado adscrito al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, investiga los accidentes e incidentes marítimos, producidos en o por buques civiles españoles, y en o por buques civiles extranjeros, cuando se produzcan dentro de las aguas interiores, en el mar territorial español o fuera del mar territorial español, cuando España tenga intereses de consideración. La investigación es exclusivamente técnica, su fin es establecer las causas técnicas que produjeron el accidente, para poder formular recomendaciones, que permitan prevenir futuros accidentes o incidentes, no estando dirigida a determinar la culpa o responsabilidad de tipo alguno.

Se conoce internacionalmente y se define la caída de planta, como “Power Blackout” o simplemente “Blackout”.

Del estudio estadístico de caídas de planta o “Blackouts”, se deduce que no son un problema menor y requieren una atención detallada, como la que se intenta aportar en este trabajo.

Las sociedades de clasificación tienen especial interés en la seguridad, con la publicación de informes y estudios detallados, contribuyen positivamente a la seguridad marítima. Un ejemplo significativo es lo que ha publicado este año 2022 el DNV, (Det Norske Veritas), titulado “*How to*

*best prevent BLACKOUTS on Passenger vessels-DNV*”, que específicamente para Ferries proponen 3 medidas para mejorar la estabilidad de las plantas eléctricas.(Det Norske Veritas, 2022)

Las caídas de planta o “Blackouts” suelen ser debidos a diversas causas, destacamos las más habituales:

- Acoplamiento indebido de alternadores en paralelo.

Deben satisfacerse las condiciones de tener la misma secuencia de fases, misma frecuencia y tensión. Cuando coincidan sus ángulos de fase se podrán conectar. En caso contrario podemos tener una caída de planta y o posibles daños en los alternadores.

- Fallo en uno de los alternadores conectados en paralelo o en su instalación.

Se desconectará debido al sistema de protección que lleva incorporado. Los fallos típicos son cortocircuitos entre fases o tierra, sobretensiones, pérdida de excitación, sobrecalentamiento o motorización del alternador. De estar en modo paralelo con otros alternadores, se producirá una sobrecarga que hará que se desconecte por sus protecciones el 2º y así sucesivamente cayendo todos en cadena. Los fallos en la instalación del grupo de generación, suelen ocurrir por cortocircuitos en alguna de las cargas, provocando una gran demanda de corriente, que haría que sus protecciones le desconecten, pudiendo dejar al resto en sobrecarga.

- Error humano. En ocasiones por falta de material de medida y de formación del personal a bordo, el factor humano juega un papel esencial, para mantener 100 % operativos los grupos de generación eléctrica.

Este trabajo se centrará en el estudio de la falta de potencia instantánea de la planta de generación eléctrica, cuando hay cargas dinámicas especialmente inductivas, que provocan grandes huecos de tensión y caídas de frecuencia de la red durante su arranque, pudiendo llegar a desconectar el grupo que lo alimenta y el resto de cargas conectadas. El motor térmico del grupo electrógeno, llega a calarse en algunos casos.

A fin de reducir la corriente de arranque de los motores de inducción, existen diversos métodos, algunos que limitan la tensión y corriente, y por consiguiente el par del mismo, sacrificando las prestaciones del motor, de los cuales caben destacar:

- **Estrella-Triángulo.** Primero se conecta el motor en estrella, para pasar a ser conectado en triángulo. En estrella el motor se alimentará a una tensión de arranque  $\sqrt{3}$  veces menos que si estuviese conectado directamente en triángulo. La conmutación de estrella a triángulo tiene un retardo, normalmente de 50 ms, para no provocar un cortocircuito a través del arco de desconexión. Si el tiempo de retardo es demasiado grande, el motor disminuiría de velocidad y al conectar en triángulo se produciría un pico de intensidad tal, que puede provocar el



## Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica.

disparo de las protecciones. Es adecuado para arranques en vacío o con par resistente bajo al principio de la aceleración.

- **Mediante Autotransformador.** Se conecta entre la línea de alimentación y el motor. La intensidad de línea se reduce siguiendo la función del cuadrado de la relación de transformación del transformador. El par motor se reduce con el cuadrado de la tensión.
- **Mediante Convertidores de Frecuencia.** Esta electrónica de potencia, permite variar la relación tensión- frecuencia e intensidad-par del motor, así como realizar la inversión del sentido de giro y el arranque progresivo controlado. Incorporan auto protecciones como sobrecarga de corriente, bajada de tensión de alimentación, pérdida o desequilibrio de fase, bajada o subida de la tensión del Bus DC, exceso de temperatura de los transistores del tipo IGBT, etc. Actualmente, los sistemas digitales suelen incorporar además un programador lógico (Plc), que les convierte en elementos activos programables de la regulación de los motores eléctricos. El inconveniente, además del precio, que es importante, es la generación de armónicos con valores de THD (Distorsión Total de armónicos) del 30 % y más, cuando la normativa IEC a nivel industrial requiere de valores < 5 %, creando problemas en las instalaciones que requieren de expertos especializados de alto nivel para su resolución. Para satisfacer el nivel de armónicos de < 5 %, existe la solución de los convertidores de frecuencia de “frente activo” de 12 pulsos, esta solución es la óptima, y la mayormente utilizada en propulsión naval Diesel-Eléctrica, pero de un coste muy significativo, ya que además de las intensidades de miles de amperios, se trata de dos convertidores de frecuencia en uno.
- **Mediante Arrancadores Suaves.** Se trata de variar el voltaje aplicado al estator del motor, aumentándolo progresivamente para limitar la intensidad de arranque y poder controlar su par. Al igual que los convertidores de frecuencia digitales, los arrancadores suaves también son programables, pudiendo ajustar los tiempos de aceleración y deceleración. Incorpora también protecciones como las referidas en los convertidores de frecuencia. El número de arranques por unidad de tiempo permitido, es calculado por el arrancador suave, en función de la integral de la corriente requerida durante el tiempo solicitado. Su grado de generación de distorsiones armónicas es mucho menor que la de los convertidores de frecuencia por tecnología de construcción ya que lo son a base tiristores en lugar de transistores IGBT. Los costes de estos arrancadores suaves son sensiblemente menores al de los convertidores de frecuencia.

Es de significar, que con la evolución tecnológica del transporte marítimo de productos especializados tales como gases, productos químicos, refrigerados, etc., se requiere aún más de una estabilidad de las plantas eléctricas, dentro de márgenes estrechos de tensión y frecuencia, siendo esto esencial para la seguridad integral del buque.

### “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

Las situaciones de “Blackout” en aguas abrigadas, siendo muy graves, son accidentes menores en comparación con la misma situación en mar abierto adverso y especialmente en buques transportando H<sub>2</sub>, Amonia, Metanol o Metano, los fueles considerados verdes, almacenados para su propia propulsión.

Un ejemplo de accidente en aguas de abrigo, lo podemos ver en la Fig. 3, en la que un buque de pasaje, al que se le cae la planta de generación eléctrica a la salida del puerto, choca frontalmente contra el muelle, con graves daños personales, 140 personas requirieron de atención médica, así como daños materiales del buque y de la infraestructura portuaria.



**Fig. 3 Grave accidente causado por una caída de planta en el “Volcán de Tamasite”. Fuente: CIAIM 2017.**

A continuación, mostramos una tabla con algunos de los casos oficialmente reportados por el CIAIM como “caídas de planta” entre los años 2009 y 2019.(Baldick *et al.*, 2008; Atputharajah and Saha, 2009)

Es destacable la publicación de la agencia de seguridad Marítima Finlandesa, relativa a las caídas de planta “*Power Failures of ships.Safety Study*”, que desde el punto de vista de la seguridad analiza las caídas de planta.(Agencia Seguridad Marítima Finlandesa, 2022)

Tabla 1 Algunos casos de “Power Blackout” oficialmente reportados por “CIAIM” 2009-2019.

Armador	Buque	Lugar	Fecha	Avería	Fuente	Descripción
Armas Shipping	“Volcán de Taburiente”	“Santa Cruz la Palma”	15/07/18	“Power Blackout”	Periódico “Público”	Deriva frente al puerto, riesgo de integridad.
Trasmediterránea	“Albayzin”	Lanzarote	24/08/17	“Power Blackout”	“La Provincia “	Deriva 244 pasajeros, riesgo de integridad.
Armas Shipping	“Volcán de Tamasite”	Puerto “De la Luz”	22/04/17	“Power Blackout”	M.Fomento CIAIM 05/2018	Deriva 140 pasajeros asistencia médica.
FRS IBERIA, SL	“Ceuta Jet “	Puerto “De Algeciras “	5/03/15	“Power Blackout”	M.Fomento CIAIM 27/2015	Deriva contra el muelle de “Isla Verde”.
Naviera Murueta	“Luno”	Puerto “De Bayona “	5/02/14	“Power Blackout”	M.Fomento CIAIM 34/2014	Naufragio, rompiendo el barco en dos.
Acciona-Trasmediterránea	“Almudaina II”	Ibiza-Barcelona	30/07/06	“Power Blackout”	Diario “El País”	Deriva durante 7 horas, riesgo de integridad.

El arranque de los propulsores transversales de proa, suele estar asociado a un número estadísticamente significativo de caídas de planta. Este número no suele estar disponible explícitamente, debido a la confidencialidad de los datos de explotación de muchas compañías.

El presente trabajo se centra en el análisis experimental de la casuística de arranque directo de motores de inducción con corriente de arranque significativa, como es el propulsor transversal de proa, que suele ser uno de los de mayor potencia eléctrica instalado a bordo.(Carreras *et al.*, 2002) (Bosch-Tous, 1990b, 1990a, 2018)

Este motor, al tener una utilización muy esporádica, exclusivamente restringida al tiempo de maniobras en puerto, sin el soporte de remolcadores, su tiempo de funcionamiento resulta muy reducido. Esto provoca que, en algunos diseños, no reciba la atención que se merece.

El alternador debe sobredimensionarse, respecto al motor Diesel que lo arrastra, teniendo en cuenta siempre, que su corriente de cortocircuito sea superior a la corriente de arranque del motor más grande al que alimenta, generalmente el propulsor transversal de proa.

No siempre se tiene en cuenta en el diseño de la planta, que esta gran corriente de arranque, presenta un factor de potencia del orden de 0.4, es decir que demanda mucha reactiva y por tanto requiere un mayor tamaño de alternador (kVA). En barcos construidos donde se detecte esta problemática, asociada al arranque del propulsor de proa, resulta útil, la propuesta de este trabajo, (Iverson, 2007; International Electrotechnical Commission, 2009b, 2009a, 2010; ISO 10303-21, 2016; Hirsch, Parag and Guerrero, 2018), que se centrará en el estudio desde el punto de vista esencialmente electrotécnico.

## 1.2 ESTADO DEL ARTE DEL DE LOS ACUMULADORES CINÉTICOS (ACEE)

### 1.2.1 Aplicaciones y sectores relacionados

Se detallan a continuación, las aplicaciones más comunes de los acumuladores cinéticos de energía eléctrica, y algunos ejemplos concretos instalados en los últimos años:

- **Instalaciones con grandes picos de demanda de potencia.**

Es una de las grandes aplicaciones, donde el acumulador cinético desarrolla una función de alta utilidad.

- Sevoprensa de 100 Tm para estampación metálica “ARISA” alimentadas con red de potencia infinita terrestre, (2019). Sus características mecánicas son:

- trabajo por golpe de 550 kJ
- masa de 100 Tm
- 30 golpes por minuto
- carrera total de 650 mm
- deformación final de 10 mm.

Instalando acumuladores cinéticos de 3 MW, en una prensa que consume 2 MW y puntas de 3 MW, se alisa la potencia consumida de la red hasta 650 kW RMS, porque el sistema (ACEE) proporciona la corriente transitoria que ya no circula por la red. Se ahorra peso, coste y dimensión, de los elementos eléctricos, tales como: estación transformadora, cables, protecciones, etc. también se reduce el stress mecánico del conjunto.

## Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica.

En Fig. 4 y 5, se muestran las gráficas de la energía consumida por la prensa, potencia en función del tiempo, sin y con el sistema de acumuladores cinéticos de energía eléctrica y su software de gestión:

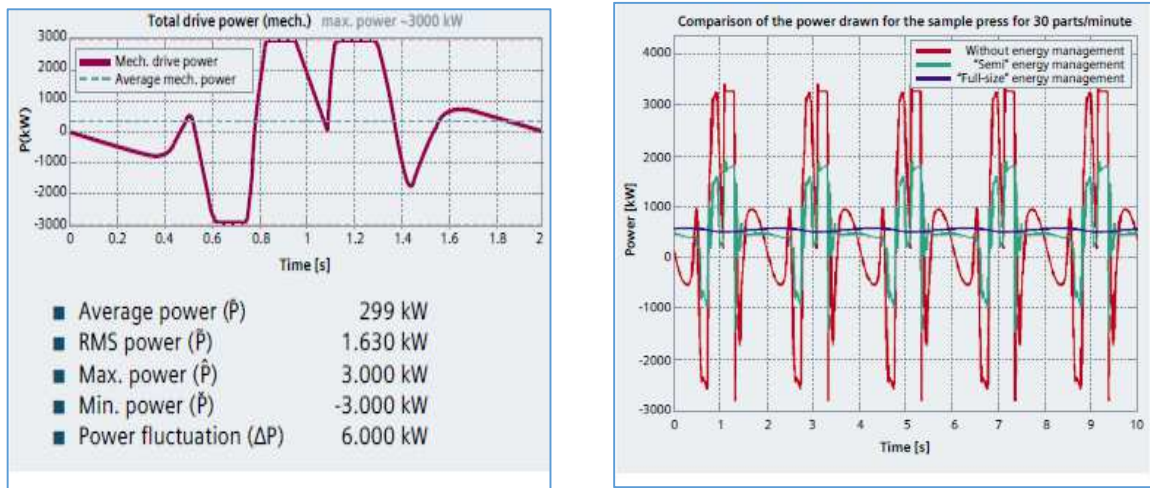


Fig. 4 Perfil de energía absorbida por la prensa en un ciclo (2s) (izquierda), con y sin regeneración (derecha). (rojo sin regeneración), (verde con regeneración parcial) y (azul con regeneración completa de 3 MW). Fuente: Siemens AG

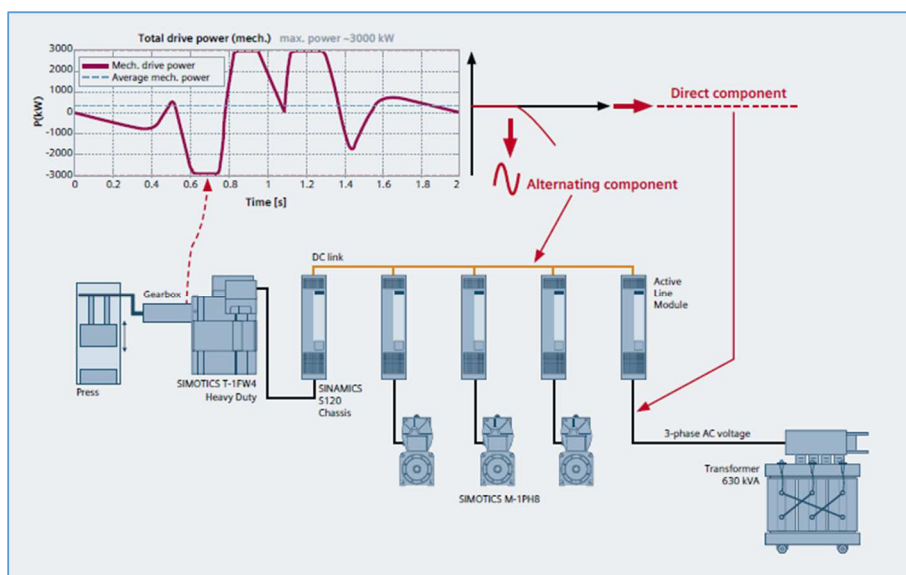


Fig. 5 Esquema del equipamiento eléctrico de la prensa, con el sistema completo de volantes de inercia. Estación transformadora. Fuente: Siemens AG

En base a un funcionamiento de la prensa de 7000 h/a, un coste mensual del suministro de 10 €/kW y un coste por consumo de 12 ct/kWh, los costes sin y con el sistema de regeneración a base de acumuladores cinéticos de energía eléctrica, son:

**Tabla 2 Ahorros con el sistema Regenerativo.**

Costes de la Prensa de 100 Tm	Coste de Energía por año para 12,6 Millones de piezas	Coste de Energía por pieza
	(€ / a)	(ct. / pieza)
Sin Regeneración	859060	6,8
Con Regeneración	501900	4,0

Con estos ahorros financieros del 41,6%, el “Pay Back” se reduce drásticamente, a cerca de la mitad.

La fuente de alimentación y la potencia de pico del transformador se reducen sustancialmente, viendo además siempre una carga de corriente constante alisada y positiva, debido a la energía que se recupera en cada ciclo (símil de la subida y bajada de la ola).

- **Fusión Nuclear (MW)**

En varios laboratorios del reino unido UK principalmente (2018-2022).

Se tiene programado el experimento y comparten el pico de potencia con la red, en un caso concreto se necesitaba de 700 kW; 300kW venían de la red y 400 kW de un acumulador cinético propio.

- **Plantas de Generación Eléctrica.**

Los acumuladores cinéticos contribuyen a su estabilidad, evitando fluctuaciones de tensión y frecuencia, producidas por variaciones transitorias de la demanda y/o desequilibrios y/o averías en la red. Se enumeran varios casos concretos:

- “*Project Store*” de Red Eléctrica, instalación realizada en la isla de la “La Gomera”, con un volante de inercia de 0.5MW / 18MWs, en 2014, consiguiendo estabilizar tensión y frecuencia.
- Lanzarote, de Red Eléctrica, subestación de “Mácher”, de 1,65 MW con descarga de energía de 18 MWs, durante 12s. desarrollado por “ABB” en 2014, para estabilizar tensión y frecuencia.
- “*Stephentown*”, USA, 200 acumuladores cinéticos de 100 MW, montados para estabilizar tensión y frecuencia. (2011)
- “*Coral Bay*”, Australia, acumulador cinético de 500 kWh, montado para estabilizar tensión y frecuencia de parque solar. (2021)

- **Sistemas de alimentación ininterrumpidas (UPS).**

Remplazan por fiabilidad, a los equipos electrónicos en potencias superiores a 500 kW.



## Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica.

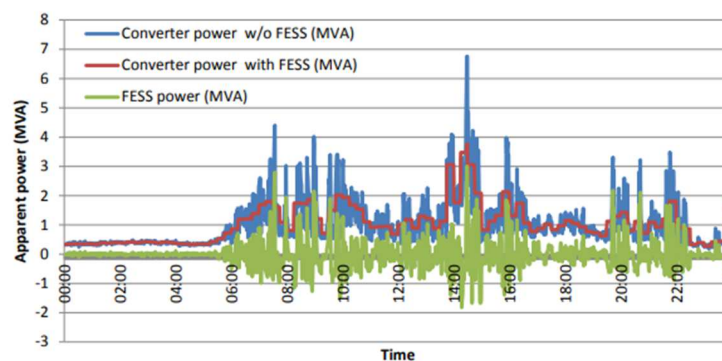
El hecho de poder montar grupos de acumuladores cinéticos y la disponibilidad de la tecnología de 3ª generación, que permite subir a valores de la velocidad rpm, de 5 dígitos, hacen que se pueda descargar energía durante largos periodos de tiempo. Se enumeran varios casos concretos:

- “*Munich*”, Alemania, instalado acumulador cinético de 155 MW. (2011)
  - “*Texas*”, USA, Central de datos, instalado acumulador cinético de 8 MW. (2014)
  - “*Dresden*”, Alemania, Planta de generación de 30 MW, donde se instaló un acumulador cinético de 5 MW con descargas en ciclos de 5s. (2021)
  - “*Austin*”, USA, instalado acumulador cinético de 4,8 MW, para reducir tiempo de parada para mantenimiento de baterías. (2020)
  - “*Alaska*”, USA, Aerogenerador de 225 kW, y dos grupos electrógenos de 150 kW, instalado un acumulador cinético de 160 kW de apoyo y estabilidad. (2015)
- **Transporte Terrestre.**

Es en tracción eléctrica, donde los acumuladores de energía cinética tienen mayor número de aplicaciones, en todo tipo de vehículo eléctrico, tren, tranvía, metro, parques temáticos, etc. y es la que además está más extendida por todo el mundo.

La energía mecánica acumulada y transformada en energía eléctrica, durante el frenado de un vehículo eléctrico, es utilizada por otro vehículo para arrancar y desplazarse.

Obsérvese Fig. 6, un estudio realizado sobre una estación de tren en Suecia, con acumulador cinético instalado de 3 MW y tráfico importante con trenes entrando y saliendo cada 15 minutos. La línea roja, es la energía entregada promedio, cada 15 minutos durante un día. La curva azul, es idéntica a la anterior, pero con el acumulador cinético descargando, la diferencia marca el ahorro de energía, mientras que la verde muestra la energía descargada por el acumulador cinético aislado. El ahorro total es del >30%.



**Fig. 6 Estudio de la energía suministrada durante una jornada, en una estación de tren, con acumulador cinético de 3 MW y descargas de 10 minutos, sobre una instalación con consumo máximo de 8 MVA. Fuente: UPC Commons “Power boosting for railway power systems T. Cantero Gubert, 2013**

Se enumeran varios casos concretos más:

- “Los Angeles”, USA, 200 estaciones de líneas de metro equipadas con acumuladores cinéticos, se logró una recuperación del 66% de la energía de frenado. (2010)
- “Oerlikon”, Suiza, en líneas de autobuses para núcleos urbanos “Gyrobus”, se instalaron acumuladores cinéticos, de 32 MJ de energía. Llega a recorrer 1,2 km sin motor térmico. (1940)
- “Daejeon”, Corea del Sur. Instalados acumuladores cinéticos en 22 estaciones de líneas de metro, para reducir picos de potencia, con ahorros en energía del 36,7%. (2011)
- “Orlando”, USA, la atracción del tren del parque temático “The increíble Hulk Roller Coaster”, realiza en cada salida del tren, una descarga de 8MW. (2016)

- **Energías Renovables.**

La energía procedente de estas fuentes, tiene una variación de generación muy alta, por las condiciones naturales de radiación solar o viento, que requieren de energía adicional, durante ciertos momentos de falta de la misma y/o para estabilizar tensión y frecuencia, así como para absorber picos de energía generados.

- “Flores Island”, Portugal, es una planta combinada de generación eólica y fotovoltaica, los acumuladores cinéticos instalados de 1 MW realizan la función de estabilizar tensión y frecuencia, así como para prolongar el suministro cuando no hay generación. (2020)

- **Aeroespacial.**

Debido a la óptima relación energía/peso, es decir a su densidad de potencia y al hecho que admite descargas profundas de forma reversible, los acumuladores cinéticos resultan ideales para este sector también.

En los satélites espaciales de la ESA (Agencia Europea Espacial), están sustituyendo las baterías químicas por acumuladores cinéticos de energía eléctrica, tanto por los ciclos rápidos de carga y descarga, como por las relaciones peso-potencia, volumen-potencia y por su mínimo mantenimiento.

- “Houston”, USA, se instalan acumuladores cinéticos en todas las naves espaciales de última generación, para sustitución de las baterías, el ahorro logrado en el programa espacial actual es de 200 M USD, reduciendo el peso (-35%) y el volumen (-55%). (2020)



## Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica.

- **Naval.**

**Muy escasa profusión**, excepto en la Marina de Guerra. (ej: Lanza Misiles, Lanzaderas en Portaviones, etc.)

Se cree que el futuro de los acumuladores cinéticos en el sector naval es brillante, ya que tiene muchas ventajas diferenciales con los demás sistemas de acumulación de energía. Sus competidores directos son las baterías químicas, con los inconvenientes de requerir de salas controladas, sistemas de extinción de incendios, vida corta, densidad de potencia baja, menor rendimiento y capacidad de cargas y descargas menos frecuentes y los ultra condensadores, actualmente aún con baja densidad de energía y muy alto coste.

Las aplicaciones que en este momento se vislumbran para este sector, son:

- En las plantas de generación, para aumentar la estabilidad, suministrando los picos de energía necesarios para evitar huecos de tensión y evitando así las caídas de planta.
- En propulsión eléctrica o híbrida, reducir la potencia media utilizada, incrementando la eficiencia del consumo total de energía eléctrica, debido a su gran rendimiento.
- En navegación con propulsión eléctrica o híbrida, mantener la velocidad constante en escenarios de navegación con mar adverso.
- Impacto medio ambiental positivo, reduciendo las emisiones producidas.

En definitiva, el futuro en el sector naval, lo es para situaciones de cargas cíclicas y alisado de los picos de energía, para aumentar la estabilidad de las plantas de generación eléctrica.

### 1.2.2 Producto acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE)

Estos sistemas están equipados de una unidad motriz con volante de inercia, que realiza la función de acumulación y descarga de energía cinética, y de un sistema electrónico de regulación programable que regula el funcionamiento del sistema y sincroniza con la red para realizar la descarga regenerativa.

Los acumuladores cinéticos, actualmente de 3ª generación, tienen sus partes mecánicas dentro de una cámara de vacío y sus rodamientos son del tipo magnético, que hacen levitar al conjunto rotórico, a fin de reducir las pérdidas mecánicas, debidas a la alta velocidad de rotación Fig. 7.

Son compactos, con gran densidad de potencia y eficiencia > 99,4%, con potencias que van desde vatios a Megavatios, de bajo mantenimiento, fácilmente escalables en potencia y ubicables en cualquier parte de la sala de máquinas, sin necesidad de un control estricto de la temperatura, ni de complejos sistemas de carga (BMS), como en el caso de las baterías.

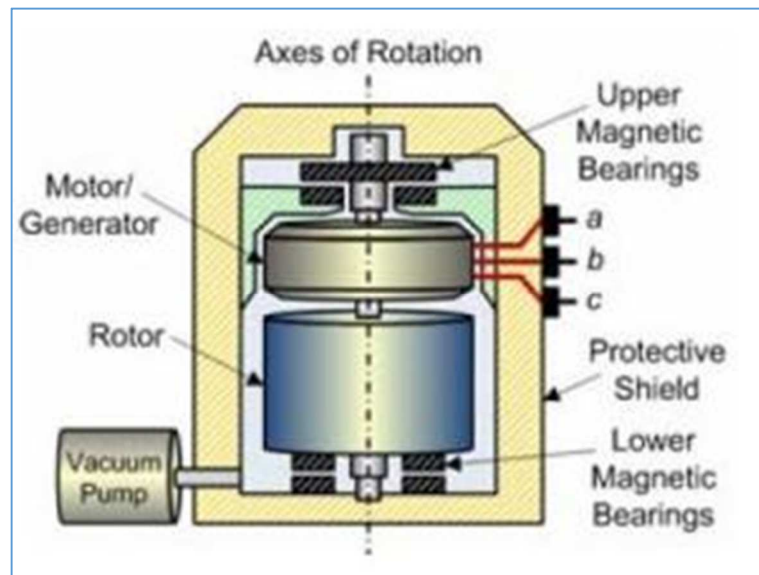


Fig. 7 Diseño de un acumulador cinético de 3ª generación de energía eléctrica. Fuente: Red Eléctrica de España 2014.

El acumulador cinético de energía eléctrica es hoy un producto maduro, ya que su uso en aplicaciones terrestres de tracción eléctrica está muy extendido, llegándose incluso a comercializar por empresas que lo tienen estandarizado en catálogo, (REE, 2014)(REE, 2018)(Sánchez, 2013) como son:

- “Amber Kinetics”
- “ABB”
- “Celenix- VYCON”
- “Temporal Power”

## Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica.

- “Beacon Power LLC”
- ” Active Power”

La empresa californiana “Celenix-VYCON” anuncia en sus catálogos, la existencia en el mercado de más 900 instalaciones de su producto (2021), con 13 millones de descargas, repetibilidad de 1 millón de veces por unidad y la disponibilidad de más 200 técnicos formados en California USA, para su apoyo post venta 24 x 7. Su aplicación principal son los Sistemas ininterrumpidos de suministro eléctrico (UPS).

En Fig. 8, se muestra su producto base de 300 kW, en un solo cuerpo de armario eléctrico, pudiendo llegar hasta 1.100 kW con 6 cuerpos y potencias mayores bajo pedido:



Operating Parameters**	
<b>Power/Duration Ratings</b>	
Max Power	300kW
Max Energy Storage	VDC XE: 4000kW seconds VDC XXE: 6000kW seconds
Run Times	See tables on page 5
Flywheel Rotational Speed	VDC XE: 36,750 to 24,500 RPM VDC XXE: 36,750 to 14,000 RPM
<b>Input</b>	
Input Voltage (Vdc)	400 - 600
Recharge Rate	15-50 Amps: Adjustable per application
Efficiency	99.4%
<b>Output</b>	
Voltage Discharge (Vdc)	400 - 520 Adjustable per application
Voltage Regulation	+/- 1%
DC Ripple	Less than 2%
Operating Temperature	-4°F to 104°F (-20°C to 40°C)
Humidity	95% non-condensing
Altitude	5,000 ft. (1524m) max without de-rating
Audible Noise	< 68dBA at 3.3 ft. (1M)
<b>Dimensions and Weight</b>	
Height	73.7 in. (1872mm)
Width	30.0 in. (762mm)
Depth	30.0 in. (762mm)
Weight	1,780 lbs. (807kg)

\*\*Specifications subject to change

Fig. 8 Acumulador cinético de energía eléctrica, llaves en mano, en armario eléctrico std comercial, 300 kW, 400-520 V. Fuente: “Celenix-VYCON”

Véase, como el fabricante de acumuladores cinéticos de energía, “Calnetix-Vycon” domina el mercado americano de USA:

“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

Tabla 3 Aplicaciones de Acumulador cinético, estadística USA, base de datos DOE “Global Energy Storage” 2020.

20 MW / 80 MWh - Energy Nuevo - Amber Kinetics	Electro-m Flywheel	California	United States	12.02.2015	Amber Kinetics
5 MW - WEB Aruba / Temporal Power (Phase 1)	Electro-m Flywheel	Aruba	Aruba	10.28.2015	Temporal Power
Camp Pendleton Fractal Grid Demonstration - 30kW	Electro-m Flywheel	California	United States	05.01.2013	Quantum Energy Storage Corporation, Imergy, Amber Kinetics
Juelich DuraStor - 420kW Flywheel	Electro-m Flywheel	NRW	Germany		
Marsabit, Kenya 500 kW Flywheel - ABB	Electro-m Flywheel	Marsabit	Kenya	09.01.2015	ABB
UCSD Amber Kinetics 40 kWh Flywheel	Electro-m Flywheel	California	United States	04.15.2015	Amber Kinetics
Rhode Hybrid Flywheel Energy Storage Plant - Schwungrad Energie 4 150kW un	Electro-m Flywheel	Offaly	Ireland	03.26.2015	Beacon Power, LLC
Chugach Multi-Stage Energy Storage System (MS-ESS) - 320 kW	Electro-m Flywheel	Alaska	United States	04.06.2015	Beacon Power, LLC
St Paul Island Wind/Diesel/Beacon Flywheel Power Plant Demonstration - TDX	Electro-m Flywheel	Alaska	United States	08.19.2014	Beacon Power, LLC
Virtua Health Data Center Calnetix (formerly VYCON) Flywheel	Electro-m Flywheel	New Jersey	United States	03.01.2006	Calnetix (formerly VYCON)
Alabama Public Television Calnetix (formerly VYCON) Flywheel	Electro-m Flywheel	Alabama	United States	03.01.2011	Calnetix (formerly VYCON)
Delta Dental Data Center VYCON (now Calnetix) Flywheels - 1200 kW	Electro-m Flywheel	Michigan	United States	08.20.2014	Calnetix (formerly VYCON)
Actavis Calnetix (formerly VYCON) Flywheel - 300 kW	Electro-m Flywheel	Bucharest	Romania	10.27.2011	Calnetix (formerly VYCON)
JV Industrial Data Center Calnetix (formerly VYCON) Flywheel - 215 kW	Electro-m Flywheel	Texas	United States	02.24.2012	Calnetix (formerly VYCON)
EMC Durham Cloud Data Center VYCON Flywheels - Three 675 kW Flywheels	Electro-m Flywheel	North Carolina	United States		VYCON
Follett Calnetix (formerly VYCON) Flywheel - VDC-XE flywheel	Electro-m Flywheel	Illinois	United States	05.16.2012	Calnetix (formerly VYCON)
Banner Good Samaritan Medical Center VYCON Flywheels - 600kW	Electro-m Flywheel	Arizona	United States	08.20.2014	VYCON
Texas Scottish Rite Hospital for Children VYCON Flywheels - Two 300kW Flywh	Electro-m Flywheel	Texas	United States	08.06.2013	VYCON
4.8 MW Austin Energy Control Center VYCON Flywheels - 4.8MW	Electro-m Flywheel	Texas	United States	02.01.2012	VYCON
EasyStreet Data Center VYCON Flywheels - 800kW	Electro-m Flywheel	Oregon	United States	06.01.2012	VYCON
VYCON (now Calnetix) Lights-Out Data Center - 800kW Flywheel	Electro-m Flywheel	Texas	United States	03.04.2014	Calnetix (formerly VYCON)
Mexico City Airport VYCON (now Calnetix) Flywheels - Kinetic Energy Storage F	Electro-m Flywheel	Mexico City	Mexico	08.13.2014	Calnetix (formerly VYCON)
Beacon Power 500 kW Flywheel (Tyngsboro, MA) - 0.5 MW Flywheel Energy Sto	Electro-m Flywheel	Massachusetts	United States		Beacon Power, LLC
SCE Tehachapi Beacon Gen 4 FESS - 100 kW System	Electro-m Flywheel	California	United States	05.01.2008	Beacon Power, LLC

### 1.3 PROPUESTA DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO PARA CARGAS CÍCLICAS A BORDO

Las cargas cíclicas, suponen un reto para la estabilidad de las plantas eléctricas de generación de energía, tanto por la velocidad de reacción del sistema frente a variaciones de tensión, como de frecuencia y a sus controles respectivos, que en el caso de un conjunto Diesel alternador aislado, son:

- La intensidad de excitación del alternador → Tensión de salida del Alternador.
- El regulador de flujo de combustible de la maquina térmica que lo arrastra → Frecuencia de salida del alternador.

Compensando con un sistema (ACEE) estas cargas cíclicas, conseguiremos una mayor estabilidad del grupo de generación y menores costes de grupo electrógeno, cables, protecciones y en definitiva de toda la instalación eléctrica.

La navegación con mal tiempo con embarcaciones Diesel eléctricas, es un caso particular de esta aplicación, con gran potencial de ahorro energético. En un buque de propulsión Diesel-Eléctrica y ante cargas cíclicas, el Diesel ya no ha de arrastrar el propulsor durante los episodios de máximo par resistente o máxima ola remontada, sino que solo aporta la energía media del ciclo de ola, que supone un consumo mucho menor.

Sobredimensionar el alternador, puede hacer la función del (ACEE), pues en los episodios de carga y relajación (subida, bajada de ola), se establecen entre el alternador y el motor eléctrico propulsor, admitiendo una ligera oscilación de la frecuencia de la red de corriente alterna CA, que permite aprovechar las inercias de las masas rodantes de generación.

#### 1.4 JERARQUIZACIÓN DE CARGAS

Merece la pena diferenciar los tipos de cargas eléctricas en los buques en general, a fin de alimentarlas de la forma que nos asegure su óptima estabilidad, incluso durante los periodos transitorios de arranque de sus motores de inducción. Separar las fuentes de electricidad y las instalaciones que alimentan las diferentes cargas, permite que las cargas sensibles, no queden afectadas por las oscilaciones de tensión y frecuencia, que producen los arranques de los propulsores eléctricos.

Una posible clasificación o jerarquización de cargas, de deseable aceptación en el mundo naval, es:

- Críticas: Radio e Instrumentación de Navegación. (1)
- Esenciales: Iluminación y achique. (2)
- Principales: Propulsión y sus auxiliares.
- Interrumpibles: Climatización.
- Excedentes: Osmosis inversa, carga de baterías y compresores.

Las cargas del tipo (1) y (2), por su importancia y potencias menores asociadas, pueden alimentarse directamente con corriente continua, CC y alimentadores combinados con baterías, para asegurar su buen funcionamiento, independizándolo así de la red trifásica más expuesta a perturbaciones de tensión y frecuencia.

## 1.5 CONTROLAR O PROTEGER. EL GRAN DILEMA DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

La sobrecarga eléctrica de algunos segundos, alimentando propulsores eléctricos, suele interesar en la mar puntualmente, para ciclos de sobrecarga-relajación, maniobras límite de atraque o anticolidión, tales como “*Crash-Stop*”.

Para ello el alternador debe mantener su tensión en bornes, controlando adecuadamente su excitación, aunque la corriente supere la nominal, entrando en la zona de sobrecarga, durante minutos o de cortocircuito durante algún segundo.

Los alternadores deben protegerse frente a sobrecargas y cortocircuitos, que puedan producirse en la red que alimentan, Mas allá de las cargas habituales, que no deben producir disparos intempestivos.

La protección magnetotérmica no es suficiente a bordo, ya que como se ha indicado, el alternador síncrono comercial, no dará más de 3 veces su corriente nominal. Los magnetotérmicos comerciales, están previstos para redes de potencia infinita, con intensidades muy grandes durante tiempos más breves, según la ley  $I^2 t$ . Requieren entre 5 y 10 veces esa corriente, para disparar en caso de cortocircuito, eso ocurre al conectarse en tierra, pero no con la generación a bordo, cuya corriente máxima no suele superar  $3 I_N$ , alargando los tiempos recomendables de desconexión.

Por esta razón el sistema de protección de un alternador a bordo, frente a cortocircuitos de larga duración, debe incluir un relé térmico y un relé de disparo diferido con retardo de 10 s. después del cortocircuito.

Todas las instalaciones terrestres y navales deben soportar un cortocircuito, durante un tiempo mínimo de 1 segundo (Hans Sauer, 1986)(Ravindranath and Chander, 1977), que es la corriente que demandan los motores eléctricos, durante la aceleración de su rotor.

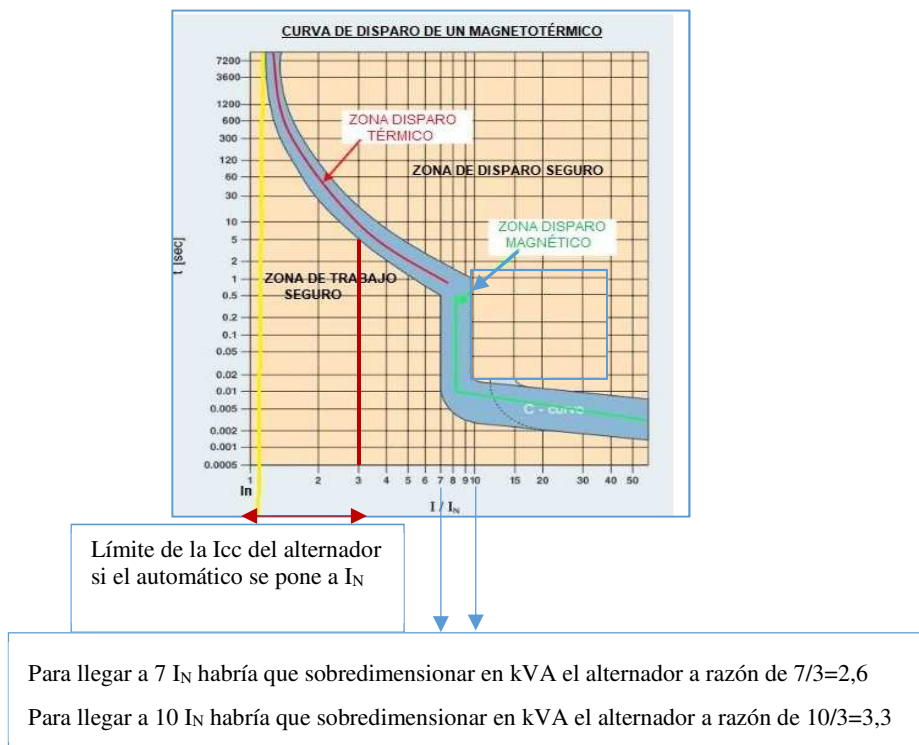
En las instalaciones terrestres, mediante las protecciones magnetotérmicas adecuadas, se permiten corrientes de sobrecarga, incluso ocasionalmente cercanas a las de cortocircuito de  $20 I_N$ , sin dispararlas en milisegundos. Es lo que demandan las reactancias internas, para magnetizar su núcleo magnético asociado, lo cual supone un óptimo aprovechamiento de las capacidades de las instalaciones, con calentamientos asumibles.

Por tradición y márgenes de seguridad en el campo naval, se está desperdiciando una zona de trabajo que es “segura” (ver Fig.9). Esta permitiría evitar en muchas ocasiones caídas de planta innecesarias, modificando ligeramente los grupos electrógenos, para que puedan suministrar esas corrientes transitorias, durante fracciones de segundo.

Para poder trabajar en toda la zona segura, entre 7 y 10 veces  $I_N$  del alternador, limitada por la curva de disparo de la protección magnetotérmica, se ha de asegurar que el alternador sea capaz de suministrar esa corriente. Para ello se sobredimensionará ( $\approx 2,6$  a  $3,3$  veces), respecto a la potencia del Diesel que lo arrastra, acercándose al símil terrestre, siempre que existan grandes motores de carga, cuya corriente de arranque lo justifique. Este sobredimensionado resulta imprescindible en propulsión Diesel-eléctrica.

Este criterio todavía no está generalmente asumido por Astilleros y Armadores, que lo consideran caro, sin ser conscientes del riesgo que asumen, en cuanto a la inestabilidad de las plantas de generación a bordo.

Si representamos la curva de disparo de una protección magnetotérmica, colocando en ordenadas el tiempo en s. que tarda en disparar y en abscisas la relación intensidad de disparo respecto a la intensidad nominal, se observa en Fig. 9:



**Fig. 9: Curva de Disparo de un interruptor Magnetotérmico en instalación terrestre (Transformador). Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).**

La corriente nominal del alternador ( $I_N$ ), define la que puede mantenerse de forma permanente, sin recalentarse. Si está en fase con la tensión, representa la potencia activa que, el alternador suministra a las cargas resistivas, a través de la corriente que consumen. El motor térmico, debe aportar al alternador el par correspondiente a esa potencia activa, más las pérdidas de éste.



## Introducción a la problemática de las caídas de planta eléctrica.

La energía reactiva no genera par resistente significativo en el eje del alternador, sino solo una oscilación torsional. Por eso el Diesel no debe sobredimensionarse, para poder alimentar cargas inductivas. El interruptor automático de protección, ha de dimensionarse de acuerdo con el alternador y su corriente nominal.

La línea amarilla,  $I/I_N > 1$  (Fig. 9), marca la zona a partir de la cual el interruptor puede disparar. Como se observa en el gráfico, en estas condiciones debería estar más de 7200 s. (2h) a esa corriente para que abriera, pues esa ligera sobrecarga, no genera calentamientos inasumibles por las inercias térmicas  $I^2t$ .

Se observan igualmente (Fig. 9), dos curvas que delimitan la zona azul de actuación, la inferior que es la del tiempo mínimo de disparo, en función de la intensidad que lo atraviesa, y la superior, que representa el tiempo máximo que puede tardar en abrirse, en las mismas condiciones.

Existen dos zonas de disparo. Una por bi-metal (térmico), lento y preciso ( $I^2t$ ). Otra para mayores intensidades, disparo magnético, rápido y menos preciso, con las limitaciones del mecanismo. Para una intensidad fijada, el intervalo de incertidumbre del tiempo que tardará en abrirse, será el que hay entre a la curva inferior y la superior.

Hay varias zonas de trabajo que se pasan a definir:

- Zona de Trabajo Seguro: es la zona que está por debajo de la curva inferior. En esta zona el interruptor (PIA), trabaja de forma segura y estable sin abrirse. No dispara ninguno de la serie, protegiendo al circuito en caso de sobrecarga o cortocircuito.
- Zona de Incertidumbre (Color azul): Zona donde el interruptor (PIA) abre en algunos casos y en otros no, variando la proporción entre ambas actuaciones según la proximidad a los límites. Define los tiempos mínimos y máximos de apertura, para una intensidad determinada.
- Zona de Disparo Seguro: Es una zona límite, que deben resistir las instalaciones sin quemarse, cuando el PIA llega a esta situación, ya debe estar abierto para proteger el circuito, han disparado todos los de ese modelo de interruptor o serie de fabricación, el límite lo define la curva superior.

## 1.6 METODOLOGÍA DEL PRESENTE ESTUDIO

Se ha utilizado en esta tesis una metodología experimental, reproduciendo en el laboratorio la cadena energética usual a bordo, a partir de materiales disponibles en el mercado especializado de control de motores eléctricos y grupos electrógenos, en la gama cercana a los 11 kW, para facilitar la experimentación. (Amiryar and Pullen, 2017)

Por un lado, se evidencian las problemáticas asociadas al dimensionado comercial tradicional del alternador, de una potencia en kVA igual a la del motor Diesel en kW que lo arrastra, para determinar con registros de osciloscopio las evoluciones temporales de tensiones y corrientes.

En nuestro caso se han analizado los episodios sub transitorios y transitorios, (Kosztaluk, Loboda and Mukhedkar, 1981; Kanellos, Hatzilau and Prousalidis, 2007; Martinez-Velasco, 2010; Kjerstad and Skjetne, 2016) mayoritariamente derivados del arranque de motores de inducción de jaula de ardilla, alguno de marca blanca como el motor “Novat”, cuya corriente de arranque alcanza casi 10 veces la nominal. Es de potencia 4 kW, 230 V, 50 Hz, 1420 rpm,  $I_n$  8,5 A,  $I_0$  4 A,  $I_s$  70 A, Su arranque directo, cala al motor térmico que arrastra al grupo electrógeno comercial “Honda”, de 6,4 kW/6,5 kVA. Es un ejemplo singular que evidencia las limitaciones del diseño basado en la potencia nominal de las máquinas, pues aparentemente un grupo electrógeno de 6,4 kW/6,5 kVA debería poder arrancar correctamente un motor de inducción de 4 kW.

Por otro lado, se ha trabajado mayoritariamente con un grupo electrógeno, con el alternador sobredimensionado un 85%, factor 1,85, (8.5 kVA), respecto al motor de gasolina que lo arrastra (4,6 kW) (Grupo Electrónico “RAS” 4,6 kW/8.5 kVA). Este sobredimensionamiento va en la línea que se propone en esta tesis, demostrando experimentalmente, que es el camino correcto, pues este grupo electrógeno “RAS”, arranca perfectamente el motor “Novat”, aunque sufre un hueco de tensión significativo.

Se ha construido y ensayado un sistema de acumulador cinético de energía eléctrica, que denominamos (ACEE), “Acumulador Cinético de Energía Eléctrica”, para explorar una propuesta de solución con volante de inercia asociado a un motor de inducción y un sistema electrónico de regulación, con control de 4 cuadrantes.

Aunque precisa de ajuste para cada aplicación, puede ser una solución viable en instalaciones ya existentes y legalizadas.

## 1.7 MEDIOS

Los trabajos de construcción y ensayo se han realizado en los laboratorios y talleres eléctrico y mecánico de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de Ingeniería eléctrica (DEE), contando en todo momento con la excelente colaboración de los responsables de los mismos.

La financiación ha sido compartida por el Dr. Ricard Bosch-Tous y este doctorando, habiéndose conseguido donaciones en especie, siendo las más significativas:

- Los convertidores de frecuencia (VSD) y su aparatada asociada a la regeneración, de la firma “Control Techniques” (Grupo Nidec), valorados en más de 6.000 €.
- La aparatada de protección y maniobra ha sido financiada por la “Cuenta de servicios a la industria CTT-UPC, Ricard Bosch-Tous”. El importe es del orden de 3.000 €.
- El valor de los materiales consumidos de los almacenes de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de Ingeniería eléctrica (DEE) se estima en más de 2500 €.

Se ha contado con la inestimable colaboración para esta construcción y ensayo de dos personas de gran profesionalidad, valía y entusiasmo:

- Joan Medes-García, experto en instrumentación y ensayos del Centro Técnico de “SEAT”.
- Toni Duran-Pascual titulado de la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC) en Grado en Tecnologías Marinas y Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval.

Cabe mencionar también la colaboración de otros grandes profesionales como:

- Alexandre Serrano, Dr. Ingeniero industrial, experto en redes eléctricas, director técnico de “*Eléctrica Serosense*”.
- Ramon Serra, director de la empresa “*Predictive-Sigma*”, expertos en analizadores, doctorando UPC.
- José Pastor, Director Técnico de “*Control Techniques*” (Grupo Nidec).
- Ignacio Joaniquet, Técnico especializado en sistemas regenerativos también de “*Control Techniques*” (Grupo Nidec)

## 2 IMPORTANCIA DE LOS MODELOS TEÓRICOS EN LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y SU ANÁLISIS TRANSITORIO

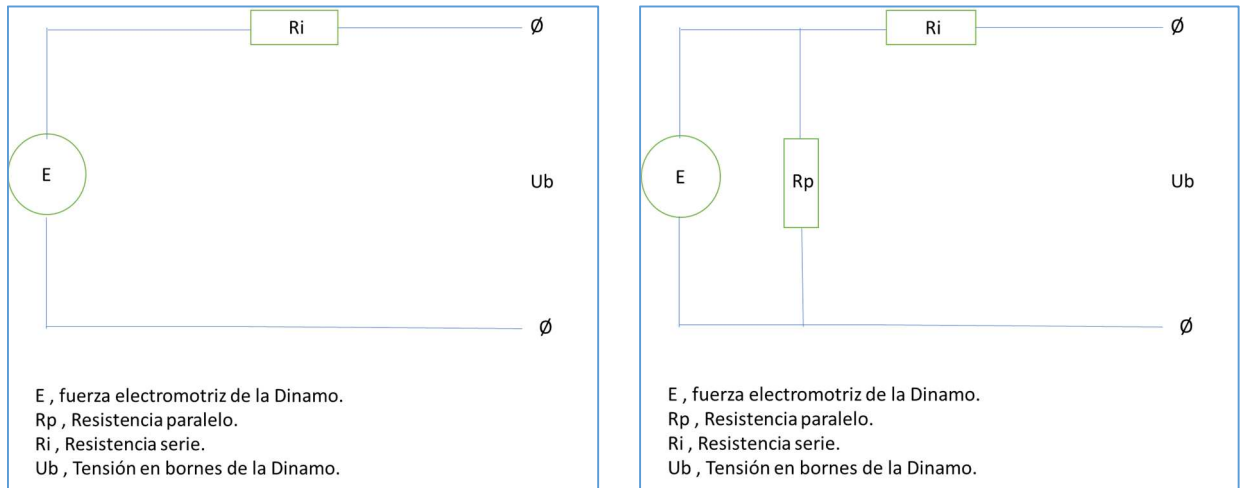
El teorema de Thévenin, ayuda a simplificar la complejidad de los circuitos eléctricos, mediante la modelización por uno que llamamos “circuito equivalente” mucho más simple, constituido generalmente por una fuente de tensión  $E$  y una resistencia interna serie  $R_i$ . (Salazar, 2017)

Las ventajas del “circuito equivalente” son:

- Permite realizar cálculos de tensiones y corrientes de un circuito al que se le conecta una carga, determinando las caídas de tensión internas que provoca. Resulta especialmente útil para analizar los límites de operación, incluso durante las condiciones más severas.
- El equivalente Thévenin, se puede aplicar a cualquier circuito por más complejo que sea, siempre que haya al menos una fuente de tensión independiente.
- Permite determinar la corriente de auto descarga interna, en baterías químicas, a la que pueden sumarse otros conceptos como relojes o consumos permanentes de control “en espera” de órdenes.

## 2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE THÉVENIN, DE UNA FUENTE DE ELECTRICIDAD TIPO BATERÍA DE PB-ÁCIDO

Su circuito simple equivalente es Fig. 10:



**Fig. 10 Circuito Equivalente simple de una batería Pb-ácido y circuito con resistencia paralelo Rp. Fuente: Propia.**

Se puede encontrar información detallada acerca de lo que es y representa el circuito equivalente de Thèvenin en: Don H.Johnson, “Equivalent circuit concept:the voltage-source equivalent,” in *IEE vol91*, 2003, p. 4.(Don H.Johnson, 2003)

Esta resistencia serie interna serie  $R_i$ , permite determinar las caídas de tensión internas de la fuente, asociadas a la circulación de una corriente hacia la carga. También limita la corriente máxima que puede suministrar la batería, su valor óhmico varía con el estado de carga, edad y otras características de la misma.

En aplicaciones como el arranque de motores Diesel, el valor óhmico de la resistencia interna serie  $R_i$ , interesa que sea lo más pequeño posible, para disponer de una elevada corriente para el motor eléctrico de arranque.

El circuito básico equivalente Thévenin de una batería, puede complementarse añadiendo una resistencia eléctrica interna  $R_p$ , en paralelo con la fuente de tensión. Esta resistencia ha de ser lo más elevada posible, para evitar la auto descarga de la batería.

El valor de la tensión en bornes  $U_b$ , se formula así:

$$U_b = E \pm I \cdot R_i$$

**Ecuación ( 1 ) Cálculo de la Tensión en bornes  $U_b$  en una batería de Pb-Ácido.**

El signo + es por la corriente de carga de la batería.

El signo - es por la corriente de descarga.

Solo es medible la tensión en bornes  $U_b$ , mientras que  $E$  fuerza electromotriz (f.e.m.), se considera un parámetro interno de difícil cálculo.

En la Fig. 11 se observa que, cuando la batería se está cargando desde una fuente externa, la tensión en bornes es superior a la fuerza electromotriz  $E$  generada y en consecuencia la corriente fluye de fuera hacia dentro, siendo entonces el signo de la caída de tensión positivo, es decir que suma tensión. Cuando la batería alimenta a otras cargas, es menor la tensión en bornes que la fuerza electromotriz  $E$ , debido a la caída interna de tensión es  $R_i \cdot I$  y esto resta tensión a la  $E$ , el signo correspondiente es negativo. La energía que se disipa en las resistencias internas ( $R_i, R_p$ ), viene a representar la energía que se pierde irreversiblemente en forma de calor, básicamente por efecto joule en los conductores y electrolitos.

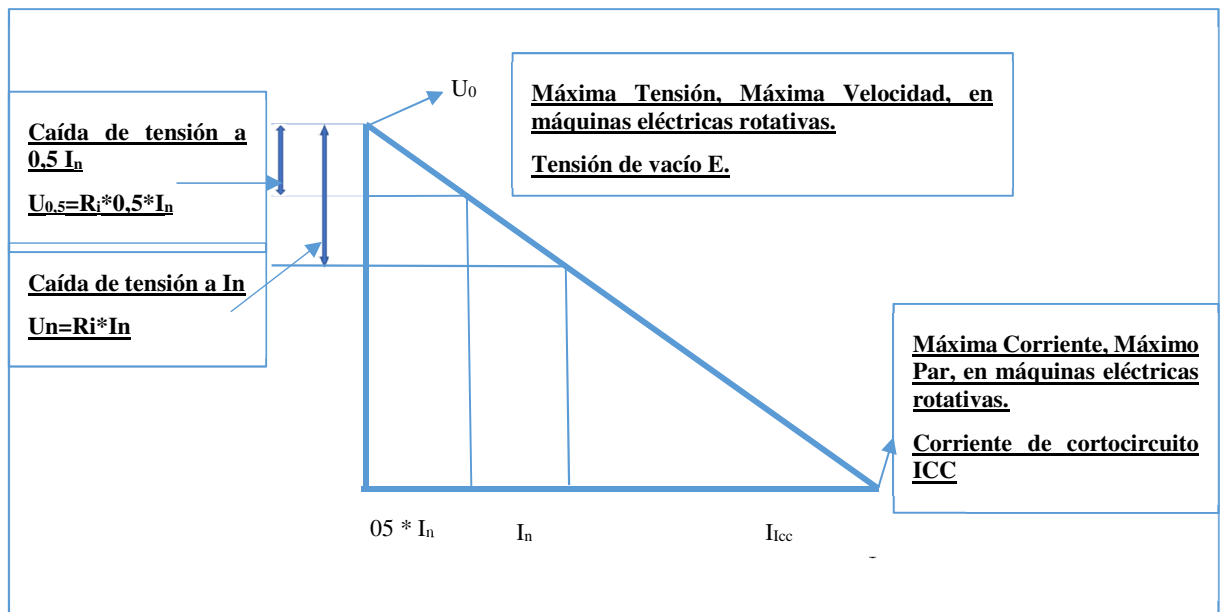


Fig. 11 Máxima Tensión y Corriente de una batería Pb-Ácido. Fuente: Propia.

La resistencia interna  $R_i$ , permite determinar la corriente máxima que circula al puentear los bornes de salida, denominada corriente de cortocircuito, se formula así:

$$I_{cc} = E/R_i$$

Ecuación ( 2 ) Cálculo de la Corriente de Cortocircuito de una Batería Pb-Ácido.

Es un valor teórico de corriente que, si llega a circular más tiempo del previsto en el diseño, puede resultar destructivo.

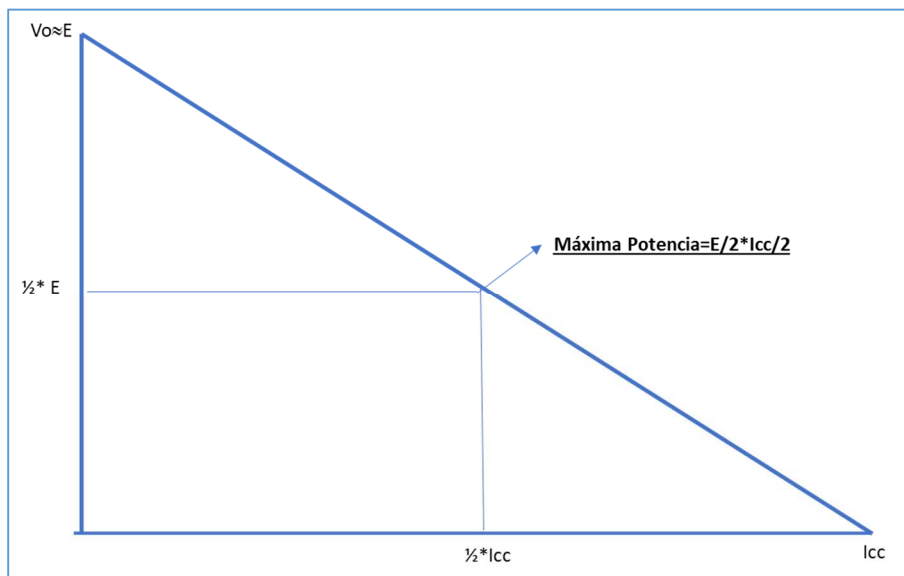
### Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio

Para estimar la fuerza electromotriz  $E$ , se realiza el ensayo de vacío, midiendo la tensión en bornes  $U_b$  sin cargas conectadas. Al ser cero la corriente que circula por la resistencia interna, es despreciable su caída de tensión y, por tanto, puede admitirse:

$$E=U_b$$

**Ecuación ( 3 ) Determinación de E en una Batería Pb-Ácido.**

Pueden añadirse otros elementos, según el grado de detalle del análisis a realizar, como pueden ser inductancias y capacidades parásitas internas, o elementos de modelización de la formación de gases a partir de la ebullición o hidrólisis del agua, cuando la batería ya está al 100% de carga y continúa recibiendo corriente de carga.



**Fig. 12: Máxima Potencia de una batería Pb-Ácido. Fuente: Propia.**

Otra utilidad del circuito equivalente, es determinar la máxima potencia extraíble de una fuente de tensión, que viene limitada por su resistencia interna. Tiene su máximo en una batería, cuando la  $U_b = 1/2 * E$  porque maximiza el producto  $P = V * I$  Fig. 12.

Para determinar la resistencia interna  $R_i$ , se realiza el ensayo de cortocircuito, en el que se miden las caídas de tensión en bornes que generan una o varias cargas de corriente conocidas, sin superar la corriente nominal de la fuente, para no dañarla. Con ello se plantea un sistema de ecuaciones, cuya solución permite determinar la  $R_i$  y a partir de la ecuación (2), se calcula la máxima corriente teórica alcanzable, o corriente de cortocircuito.

### 2.1.1 Aspectos tecnológicos

Una batería Pb-ácido, está constituida por un recipiente de ácido sulfúrico diluido, que contiene un conjunto de placas de plomo, montadas paralelamente entre sí, aisladas y dispuestas alternadas en cuanto a polaridad positiva y negativa. Son las más utilizadas en los vehículos de tracción y motores térmicos, debido a la alta corriente que son capaces de entregar en un corto tiempo, al bajo coste, a su robustez y con tensión por elemento, del orden de 2 V.

Si existe la posibilidad de vuelco, son más adecuadas las de Pb-Gel. (Bañeres S. and Cortina P., 2003)

Las placas positivas tienen un recubrimiento de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), y las negativas son de plomo esponjoso.

La conexión de las distintas placas de plomo en el interior de la batería, se realiza en paralelo para aumentar la superficie de electrodo y bajar con ello la resistencia interna serie  $R_i$ , todos los positivos conectados juntos y todos los negativos juntos igualmente. La tensión total, es de esta forma, la suma de las tensiones de los 6 vasos para dar el total de 12 V, por ejemplo.

La densidad del electrolito a plena carga es de 1,280 g/ml, bajando en la descarga a 1,100 g/ml (14%), debido a que la concentración de ácido sulfúrico baja por la formación del sulfato de plomo y a que en su reacción libera agua y diluye el ácido. Esta variación de la densidad se puede utilizar como medidor del estado de carga de la batería, (SOC.), (*State of Charge*).

La variación de la tensión en vacío por cada vaso de una batería a plena carga y completamente descargada varía poco, desde 2,15 V a plena carga hasta 2 V descargada, solo un (7%). (Fernández *et al.*, 2005)

La resistencia interna  $R_i$ , produce por efecto Joule, principalmente calor en el interior de la batería.

El valor óhmico de la resistencia interna  $R_i$ , depende de:

- Modelo y fabricante de batería.
- Edad de la batería.
- Historia de sobrecargas y descargas profundas.
- Estado de Carga (SOC)

La batería que hemos estudiado y que nos sirve de referencia es:

- Tecnología: Plomo Gel.
- Fabricante: YUASA.
- Tensión de 12 V.



## Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio

- Capacidad 7 Ah.
- I máxima carga 2 A.

Los ensayos realizados con anterioridad, determinaron:

- al 100% de carga su  $R_i$  es de  $0,05 \Omega$
- al 30% de carga su  $R_i$  es de  $0,5 \Omega$  y en consecuencia 10 veces más de caída de tensión interna y 10 veces menos de corriente de cortocircuito)

Una resistencia interna serie  $R_i$  baja, suele ir asociada a una distancia corta entre placas de la batería. que penaliza los valores de auto descarga. Esto suele ser necesario para el arranque de motores Diesel. En el caso de instalaciones de energía solar, es asumible una resistencia interna mayor, que implica una menor corriente de cortocircuito, y poder así conseguir un auto descarga minimizada.

Los valores de  $R_p$  y  $R_i$  dependen de factores constructivos internos, entre los que se ha de llegar a un compromiso de renuncias técnicas, en función de la aplicación. Para arranque de motores Diesel, prima que  $R_i$  sea baja, pero en instalaciones de energía fotovoltaica suele más importante evitar la auto descarga de la que es responsable la  $R_p$ .

Las baterías tienen características especiales, que cabe destacar:

- Son capaces de proporcionar una elevada corriente instantánea, aunque sea sacrificando su vida útil y el rendimiento energético.
- Densidad energética baja, debido a su gran volumen y peso en relación a la energía almacenada.
- Su  $R_i$  y en consecuencia su tensión en bornes, varía fuertemente con el estado de carga, de 10 veces, desde el 100% de carga al 30%, en las de Pb gel.

Las baterías envejecen dependiendo de la temperatura de trabajo, del número y tipo de ciclos de carga/ descarga sufridos, picos de corriente a que se les ha sometido, etc.

Su funcionalidad se ve fuertemente afectada por la temperatura. (Carrasco M, 2017)

La resistencia interna paralelo  $R_p$ , es un valor que, siendo variable con el tiempo, depende de la forma constructiva de las baterías.

La degradación de los electrodos con el tiempo y sus ciclos de carga, hace que vaya disminuyendo el valor óhmico de  $R_p$ , de forma que cada vez se auto descarga más deprisa, ejemplos: en automoción se acepta 1 mes, en aplicaciones fotovoltaicas 1 año, idealmente es recomendable más tiempo.

Los consumos en *stand-by* de las cargas o instalaciones conectadas, penalizan aún más este índice, ejemplos: el reloj en los automóviles o la bomba automática de sentina en embarcaciones.

La electrolisis es un proceso químico, en el cual por la circulación de una corriente eléctrica en un líquido llamado electrolito, se produce una descomposición molecular (ionización), en la cual los iones negativos van al ánodo o polo positivo y los positivos van al cátodo o polo negativo. Tal como hemos dicho es un proceso de transporte molecular o de descomposición y por tanto destructivo de la solución allí contenida, pudiendo implicar desgaste de los electrodos.

Este proceso de electrolisis en la batería de Pb-ácido, se produce en la fase de carga, si se sobrepasa la tensión llamada de “Flotación”, que normalmente para los conjuntos de 12 V nominal es de 14,8 V. Se inicia así un proceso químico de electrolisis, liberando 2 moléculas de H<sub>2</sub> y 1 de oxígeno O<sub>2</sub> en proporciones estequiométricas y consumiendo el agua del electrolito, lo que acorta la vida de la batería y genera un peligro de explosión significativo.

Los cargadores profesionales para la recarga de baterías de Pb-ácido, disponen de sistemas para no sobrepasar la tensión de flotación. Los más económicos, no deben dejarse conectados a la batería más de 8h, pues no garantizan este control de la tensión, con el riesgo asociado de electrolisis y posible explosión.

Son habituales tres modos de funcionamiento:

- Carga.
- Igualación de tensión.
- Flotación, donde solo se compensan las pérdidas en la R<sub>p</sub>.

Los sistemas de recarga de baterías, pueden estar basados en:

- Carga a intensidad constante.
- Carga a tensión constante.
- Carga a potencia constante.

La intensidad máxima de carga recomendable es de 2 A para una batería Pb de 12 V y 7 Ah, como la de referencia (fabricante YUASA). Nos debemos asegurar en el proceso de carga, que no rebasamos el nivel de la tensión de flotación.

- La carga a intensidad constante se recomienda realizar a un nivel de C/10 (capacidad Ah dividido por 10), en la batería de referencia de 7 Ah sería una corriente de carga de 0,7 A y durante 10 a 14 h. Si se incrementa la corriente de carga, el proceso es más rápido pero la carga es menos profunda. La carga finaliza cuando se alcanza la tensión nominal. El riesgo de este tipo de carga es la posible sobrecarga que las envejece. Este sistema es el más recomendado, pero con escalones de corriente de mayor a menor, en el tiempo.

### Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio

- La carga de la batería a tensión constante, no es aconsejable en general, excepto en casos especiales y en periodos de tiempo muy cortos, ya que las corrientes son muy elevadas, por lo que, de realizarse, se aconseja un seguimiento estricto de la temperatura.
- En la carga basada en transferencia a potencia constante, se varía la intensidad y la tensión para mantener su producto constante. Este proceso es para cargas rápida y cortos periodos de tiempo.

Existen procesos de carga mixtos, como los de potencia constante con escalones en el tiempo, con o sin un determinado umbral de tensión, que consiguen cargas completas a un coste reducido.

Otra forma de carga de baterías en automoción, es mediante el frenado regenerativo del vehículo, que puede resultar problemático, pues las baterías no absorben la corriente de frenado de forma eficiente, en tiempos de algunas decenas de segundos.(Domingo, 2015)

### 2.1.2 Agrupaciones de baterías

Existen dos formas de conectar un grupo de baterías:

- Serie, aumentamos la tensión disponible, manteniendo la corriente nominal.
- Paralelo, aumentamos la corriente disponible, manteniendo la tensión.

Aunque sean del mismo modelo y fabricante habrá siempre pequeñas diferencias en los valores de  $E$ ,  $R_i$  y  $R_p$  que generan desviaciones no deseadas en la tensión disponible  $U_b$  de cada elemento.

Cuando sean grupos de baterías, se recomiendan sistemas inteligentes de control de la recarga, los llamados “*Battery Management Systems*” (BMS), que monitorizan y gobiernan la carga individual en tensión y corriente, de cada una de ellas. (Atcitty *et al.*, 2013; Araceli and Sillero, 2018)

En los montajes en paralelo sin BMS, pequeñas variaciones del nivel de tensión interna  $E$ , generan una corriente de circulación entre elementos en paralelo, que solo viene limitada por las respectivas resistencias internas serie, que son pequeñas. Esto produce una descarga del conjunto en algunas horas, si no se dota de dispositivos para evitarlo. (Cheng *et al.*, 2011)

En los montajes en serie sin BMS, si hay una batería con un nivel de carga diferente, esta puede calentarse desprendiendo calor en su  $R_i$ , con consecuencias dañinas y con riesgo, que puedan llegarse a producir diferencias importantes de la tensión disponible ( $U$ ). (George S. Misyris *et al.*, 2017; Martínez-Bertran, 2017) (Vega and Mayor, 2015)

Los BMS activos, disponen de un transistor por celda, para poder desviar la corriente de carga.

Mediante un programa de lógica Plc, y comunicaciones de alta velocidad tipo “*Can Bus*”, se asegura que se carguen al mismo nivel, evitando corrientes de recirculación entre ellas, y que no se sobrepasa en ningún caso la tensión de flotación.

Estos sistemas de carga “inteligente” BMS, son idóneos para vehículos híbridos y o eléctricos.

Para el arranque de motores eléctricos, se requiere de una gran intensidad de corriente en los primeros instantes, para poder proporcionar el par suficiente, esto se consigue con la conexión paralelo, porque la velocidad de rotación todavía es baja y por tanto su fuerza contraelectromotriz también.

La conexión paralelo permanente de baterías no es aconsejable, ya que, debido a la baja impedancia de las mismas, favorece la circulación de corrientes entre ellas, si las  $E$  de cada batería no son exactamente iguales.

La conmutación dinámica serie-paralelo de baterías, según las necesidades puntuales del sistema, es posible gracias al desarrollo de Julio García Calvete, en su Tesis Doctoral “Mejoras en la eficiencia de sistemas eléctricos autónomos de tracción, mediante técnicas de conmutación dinámica de

### **Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio**

recursos energéticos”. Esta conmutación dinámica, facilita el arranque de motores de inducción, activando a alta velocidad de comunicación el número de baterías en funcionamiento y su tipología de conexión mediante un programa de Plc, que gobierna una electrónica de conmutación adecuada a las prestaciones máximas de V e I.(Calvete, 2010)

Su uso todavía está restringido al ámbito de la investigación universitaria.

### 2.1.3 Arranque de motores Diesel con baterías

Para arrancar motores de combustión interna, se requiere de una alta corriente en un corto periodo de tiempo, que no suele superar los 30 segundos, resulta un ciclo de trabajo ideal para las baterías de Pb-ácido. Los valores usuales para potencias de motores Diesel del orden de 200 kW, van desde los 300 a 540 A, consumidos por el motor eléctrico de arranque, para tensiones de 12 V o 24 V. (Cueva Sánchez *et al.*, 2018)

Una vez arrancado el motor Diesel, dispone de una hora o más para recargar la batería desde el alternador con rectificador y control de excitación, dispuesto específicamente para ello y accionado por el propio cigüeñal. (Capella-Caritx, 2015)

El control de carga de la batería, actúa directamente sobre la excitación del alternador, para no superar la tensión de flotación. Una vez cargada la batería, corta la corriente de excitación y el alternador deja de suministrar corriente y por tanto de ofrecer par resistente significativo a la correa trapezoidal que lo arrastra. (Hedlund *et al.*, 2015)

Una vez parado el motor Diesel, la batería deberá mantener su carga, para seguir disponible en el siguiente arranque. Este periodo de reposo, puede ser del orden de alguna semana.

En cuanto a la capacidad, es interesante destacar que se suele hablar de  $C_x$ , esto se refiere a la capacidad de la batería realizando una descarga de  $x$  horas. La corriente que circula en un batería que se descarga en  $x$  horas, se calcula dividiendo la capacidad total Ah por  $x$ . Así si una batería tiene una capacidad total de 20 A/h, en la condición  $C_{10}$  circularía una corriente de ensayo de  $(20/10) = 2$  A, durante 10 horas.

Es aconsejable la carga lenta, para lograr su plenitud (profundidad de carga) al 100%. Se realiza con corrientes similares en 10 o 20 horas de carga.

El rendimiento energético de una batería de automoción, durante el arranque de Motores Diesel, es inferior al 10%, por la severidad del ciclo de consumo de corriente.

Las baterías de plomo-ácido tienen la limitación del incremento de la resistencia óhmica, a medida que se descargan, esto implica caídas de la tensión de alimentación muy importantes, que pueden penalizar a los elementos de control, debido a los “Huecos de Tensión”, asociados a los arranques severos de motores.

El vehículo solar eléctrico “Despertaferro”, en la competición “Sunrace 2000”, tuvo algún episodio de bloqueo del control electrónico del motor, durante el arranque del vehículo con las baterías al 30%, que generaban una caída del controlador del Bus DC, por debajo del mínimo de tensión. Al estar conectados solo por este conjunto de baterías principales, provocaba un “fallo en la fuente de energía”, por subtensión.

### **Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio**

La mejor estrategia es segregar la alimentación, de las cargas críticas como los controladores y las comunicaciones, del arranque de motores o la tracción. Estas dos fuentes pueden ser de tipos y tensiones diferentes.

## 2.2 INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

En el caso de las instalaciones fotovoltaicas, la generación de energía es muy variable, dependiendo de las condiciones cambiantes de la radiación solar, de la latitud, de la hora del día, estación y orientación de cada panel.

Las células sombreadas dejan de generar tensión. Lo que se denominan “sombras” son efectos imprevisibles, como las de las nubes o previsibles, como puede ser un edificio cercano o árboles.

La energía generada en cada célula fotovoltaica, depende además de la radiación solar, de la temperatura. (Copetti and Macagnan, 2007)

Con tantas variables, se hace necesario determinar y buscar un controlador adecuado, en cada instante del punto de máxima potencia generada, eso es lo que se llama MPPT. (*Maximum Power Point Tracker*). (De Brito *et al.*, 2013; Delta Volt SAC, 2015)

La representación gráfica Fig. 13, representa los puntos de máxima potencia, que se corresponden a los de la tangencia de la característica del generador fotovoltaico, durante un cierto valor de la radiación solar y la hipérbola cuya ecuación es  $V \times I = \text{constante}$ .

La función del MPPT. determina en cada instante este punto de máxima eficiencia energética, entre la captación fotovoltaica y el almacenamiento. (Herman *et al.*, 2006)

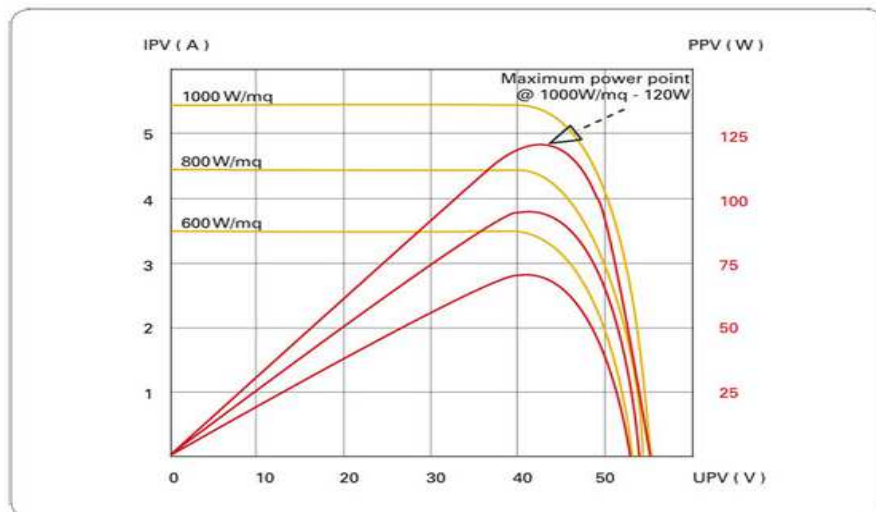


Fig. 13: Determinación del MPPT en función de la radiación solar. Fuente: Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*

El símil del MPPT en la batería de automoción, como fuente de energía hacia el motor de arranque, da un máximo de potencia a los 6V, mitad de la tensión nominal de 12V. (De Brito *et al.*, 2013)



### **Importancia de los modelos teóricos en los circuitos eléctricos y su análisis transitorio**

Actualmente los motores de arranque suelen ser de imanes permanentes, para evitar o limitar el hueco de tensión provocado por la corriente al arrancar.

En instalaciones fotovoltaicas (FV), al ciclo de carga diario, se añade el meteorológico, que puede resultar semanal y el estacional que es anual.

Las corrientes de descarga en (FV), son uno o dos órdenes de magnitud menores que en automoción, durante tiempos más largos. El rendimiento energético se acerca al 80%. Por eso, se usan baterías con resistencias internas diferentes.

### 2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA MAQUINA ROTATIVA, TIPO DINAMO

Dinamo, es un generador rotativo de corriente continua, a partir de energía mecánica de rotación.

El principio de funcionamiento, es el de un motor eléctrico de corriente continua (Motor, Motor and El, 2009) trabajando como generador, arrastrado por un motor primario al que frena. Transforma par y velocidad en corriente y tensión eléctrica.

La corriente de excitación  $I_{exc}$ , genera el campo magnético del estator, que gobierna la fuerza electromotriz  $E$  y la tensión en bornes  $U$ , responsable de la corriente del rotor que origina el par. La corriente de excitación  $I_{exc}$  debe ser alimentada externamente o a partir de los parámetros electromagnéticos disponibles.

En Fig. 14, se representa el esquema básico de una máquina rotativa de C.C., con un par de polos, funcionando como generador, con un inducido de 12 bobinas y su correspondiente colector de 12 delgas. (cada bobina comprende una sola espira, que representa un bobinado, que puede tener varias espiras).

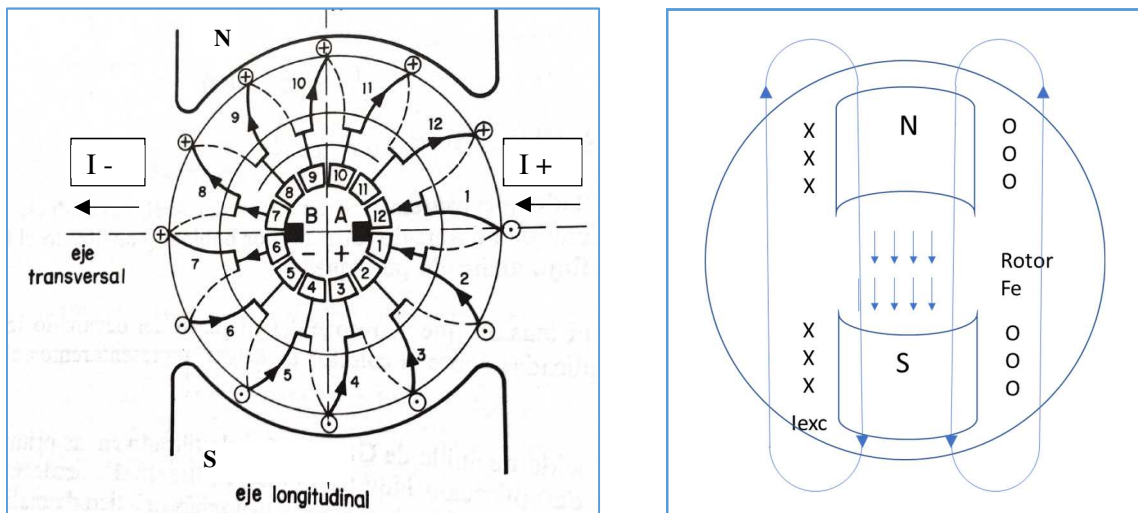


Fig. 14: Máquina rotativa de corriente continua con un par de polos, con devanado de excitación independiente. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias) y Propia.

El circuito equivalente se representa en Fig. 15:

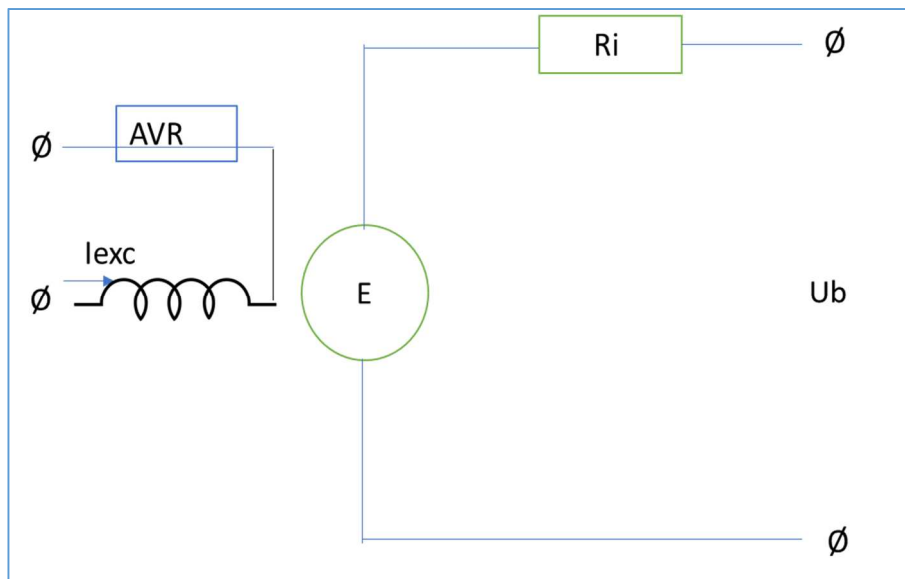


Fig. 15: Circuito equivalente de Dinamo con devanado de excitación. Fuente Propia.

El valor de la resistencia serie  $R_i$ , es ligeramente superior al de las baterías cargadas al 100%. Varía muy poco su valor, pues es constructiva, solo le afecta la temperatura y no más del 20% con incremento de temperatura de 100° C.

Es una gran ventaja respecto a las baterías químicas de plomo-ácido, que pueden cambiar este valor del orden de 10 veces, según el estado de la carga (SOC).

La resistencia paralelo  $R_p$  de una dinamo, debe incluir las pérdidas por fricciones mecánicas del eje, ventiladores y calentamientos del hierro, imanes y devanados como los de excitación en paralelo. No suelen superar el 5% de la potencia nominal.

La fuerza electromotriz  $E$ , puede controlarse a través de la  $I_{exc}$ . Esto permite compensar los efectos de la caída de tensión interna  $R_i \cdot I$ , siendo especialmente idóneo para alimentar cargas de corriente variable, manteniendo constante la tensión en bornes.

$$U_B = E \pm R_i \cdot I$$

$$E = K_e \cdot \phi \cdot \omega = K_e \cdot (K_f \cdot I_{exc}) \cdot \omega$$

**Ecuación ( 4 ) Fuerza electromotriz E y Balance de tensiones de una máquina de corriente continua.**

El controlador de la fuerza electromotriz  $E$ , que gobierna la  $I_{exc}$  requiere de un estudio específico, no solo de tiempos de respuesta y consignas, o realimentaciones de  $V$  e  $I$ , sino de la alimentación para suministrar la  $I_{exc}$ .

Las ecuaciones de par, de una máquina rotativa de corriente continua, son:

$$\Gamma = K_t \cdot \phi \cdot \bar{I}$$

Ecuación ( 5 ) Par de una máquina de corriente continua, dinamo.

siendo:

$$\phi = K_f \cdot I_{exc}$$

Ecuación ( 6 ) Flujo magnético de una máquina de corriente continua.

Así tendremos que:

$$\Gamma = K_t \cdot K_f \cdot I_{exc} \cdot \bar{I}$$

Ecuación ( 7 ) Par de una máquina de corriente continua, dinamo.

El par de una máquina de corriente continua CC tipo dinamo, depende directamente del campo magnético en el entrehierro y de la corriente que circula por el rotor  $\bar{I}$ .

Reacción magnética del inducido  $\mathcal{E}$ : Cuando la dinamo está en carga, se distorsiona el flujo del inductor, debido al campo magnético creado por la corriente del inducido, el cual es perpendicular al flujo magnético principal, creado por los polos inductores.

El flujo magnético principal disminuye, debido a que por la distorsión del mismo aumenta su recorrido, es decir su reluctancia magnética, y a su vez aumentan las fugas magnéticas, contribuyendo todo ello en la disminución del mismo.

En consecuencia, se reduce la fuerza electromotriz en carga  $E_c$  respecto a la de vacío  $E_v$ , que puede compensarse incrementando la  $I_{exc}$ .

Los inconvenientes de la reacción de inducido son:

- Disminuye la fuerza electromotriz en carga  $E_c$ .
- Disminuye el rendimiento, ya que hay que aumentar la  $I_{exc}$  para compensar la pérdida referida, en definitiva, aumentan las pérdidas en el estator.
- Peligro de chispas en el colector, haciendo más difícil realizar una buena conmutación.

Los polos auxiliares, amortiguan en parte la reacción de inducido, pero encarecen y complican la máquina.

2.3.1 Circuito equivalente de la dinamo excitada con imanes permanentes

El rotor o inducido, al girar induce una tensión proporcional a la velocidad de rotación y al campo existente, que resulta constructivamente constante Fig. 16.

El colector de delgas, conmuta los conductores cuando pasan por el polo contrario, para mantener la polaridad de la tensión en los bornes de salida, así la FEM es pue:

$$E = K_e \cdot \omega$$

**Ecuación ( 8 ) F.E.M. de una dinamo con imanes permanentes.**

El devanado inducido o rotor, tiene una resistencia interna que provoca una caída de tensión, cuando circula una corriente, que debe tenerse en cuenta en el balance de tensiones:

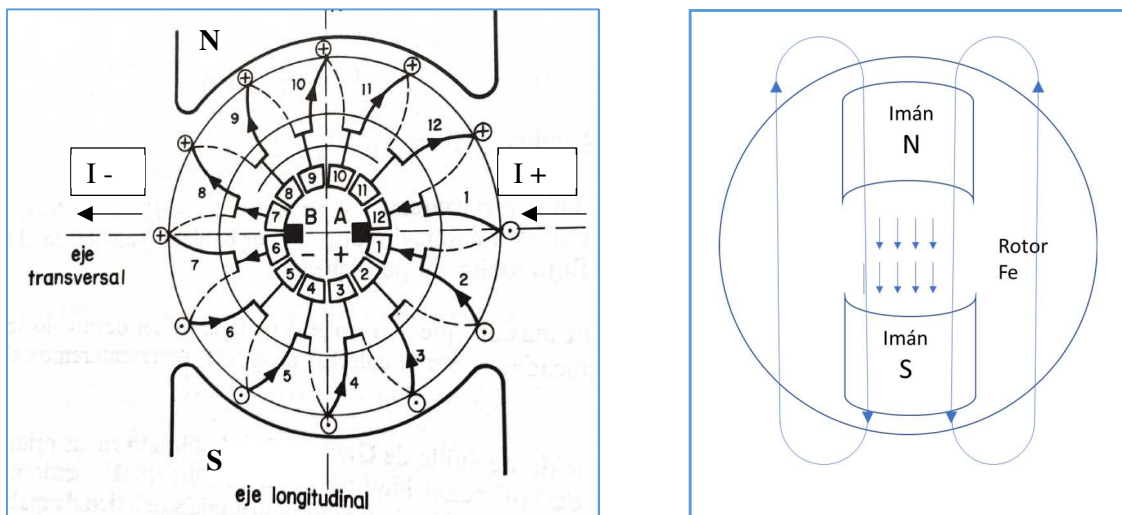


Fig. 16: Dinamo con un par de polos excitada con imanes permanentes. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias) y Propia.

$$U_b = E - R_i \cdot I$$

**Ecuación ( 9 ) Tensión en bornes de una dinamo**

El par electromagnético, que la dinamo transmite como par resistente al motor primario que la arrastra, es proporcional a la corriente que circula por el inducido.

$$\Gamma = K_T \cdot I$$

**Ecuación ( 10 ) Par transmitido por una dinamo, excitación de imanes permanentes.**

El circuito equivalente se representa en Fig. 17:

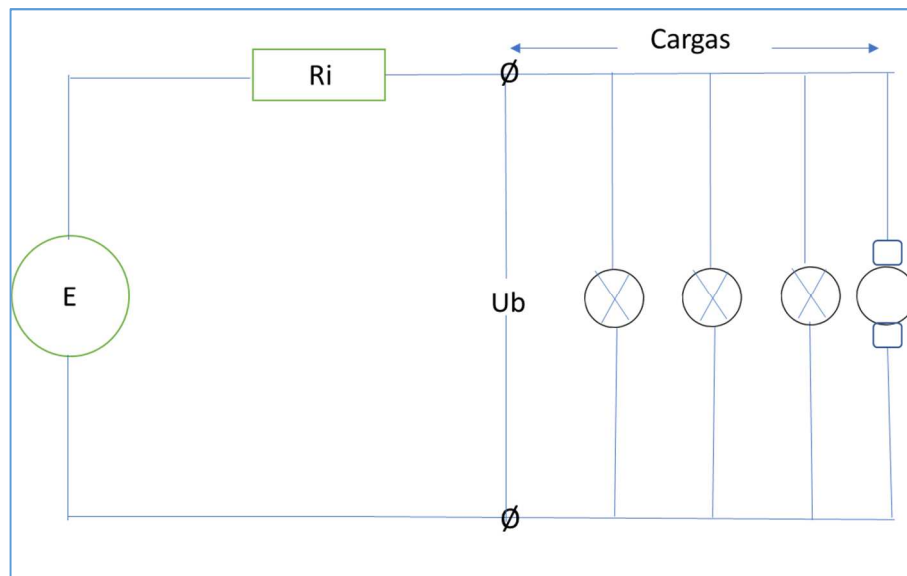


Fig. 17: Circuito Equivalente dinamo con imanes permanentes, cargas. Fuente: Propia.

En el caso de disponer de imanes permanentes en el estator, no será necesario la alimentación externa para la excitación del campo magnético

La  $R_i$ , no es tan baja proporcionalmente como la de una batería química y dificulta mucho mantener la tensión en bornes. A medida que aumentan las corrientes de carga, la tensión en bornes disminuye. Esta caída de tensión aumenta, cuando tenemos variaciones de corriente bruscas, como durante el arranque de un motor eléctrico.

Para mantener constante la tensión en bornes, solo tenemos la posibilidad de variar la velocidad de rotación del eje de la dinamo, cosa no siempre posible, pues debemos variar la aportación energética del fluido que alimenta al motor primario.

2.3.2 Sistemas de excitación

Se denomina “característica externa” de un generador de corriente continua C.C., a la representación gráfica, de la variación de la tensión  $U_b$  en bornes del inducido, en relación a la corriente  $I$  que circula por el circuito exterior, manteniendo constantes la velocidad  $\omega$  y la corriente de excitación  $I_{exc}$ .

Los generadores de C.C., pueden ser clasificados, en función del tipo de excitación tal como describimos a continuación:

Con excitación independiente, Fig. 18

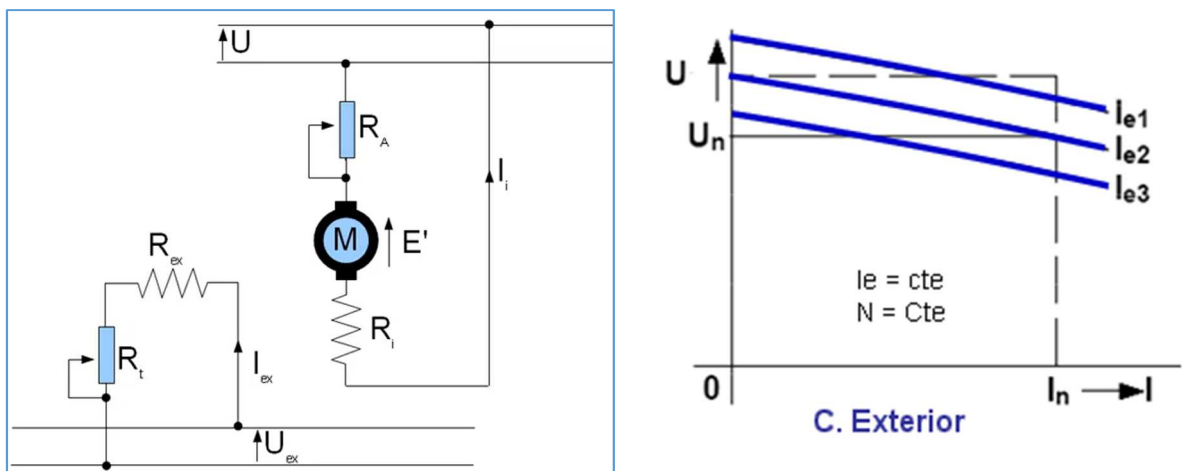


Fig. 18: Excitación tipo Independiente, Dinamo. Característica externa. Fuente: (Sancho, 2021), <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>

La corriente que circula por el estator produciendo el flujo magnético, viene de una fuente exterior. Incluye las máquinas excitadas por imanes permanentes.

Esta máquina es poco usada, por su dependencia de otra máquina que le genere la corriente de excitación.

Con excitación serie Fig. 19:

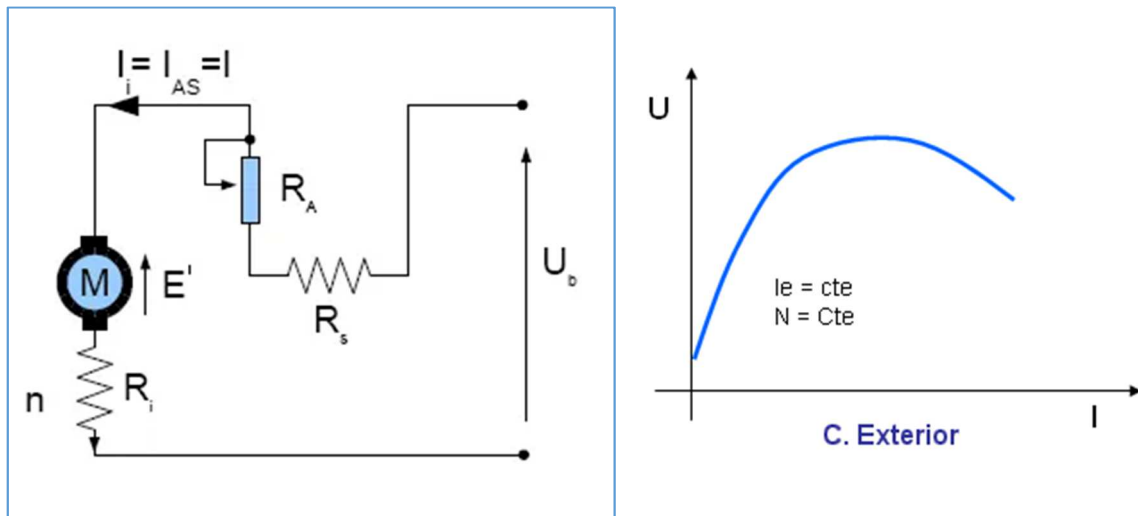


Fig. 19: Excitación tipo serie, Dinamo. Fuente: (Sancho, 2021), <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo>.

La corriente de excitación es suministrada por la propia dinamo. El inducido y el inductor están conectados en serie.

Por tanto, la corriente de excitación es la de inducido y la ecuación de par es:

$$\Gamma = K_T \cdot I^2$$

Ecuación ( 11 ) Par Dinamo con excitación serie.

Con excitación paralelo Fig. 20:

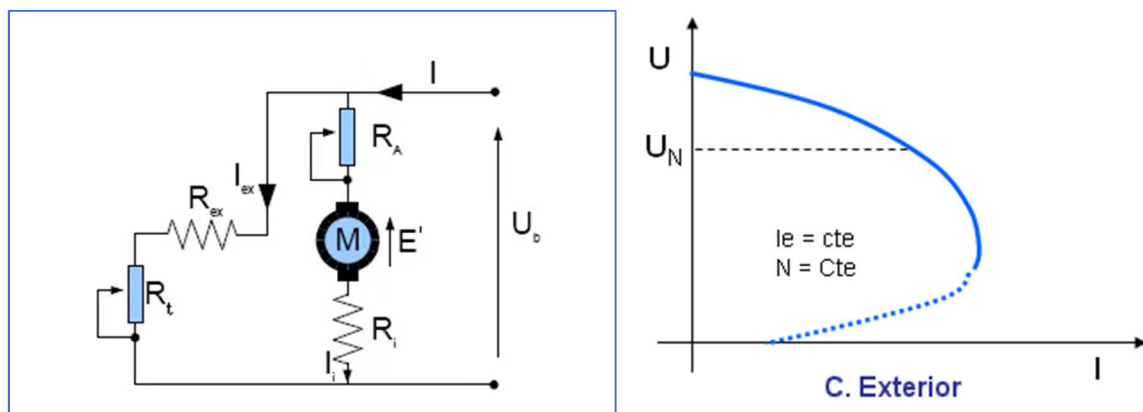


Fig. 20: Excitación tipo Shunt o Paralelo, Dinamo. Fuente: (Sancho, 2021), <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>

La corriente que circula por el inductor viene del inducido. El inducido y el inductor están conectados en paralelo.

El circuito equivalente, incluye la resistencia de este devanado.



$$R_c = U_b / I$$

$$I = U_b / R_c$$

Ecuación ( 12 ) Curva característica excitación paralelo.

Este es el tipo de dinamo más común, aunque en la zona de cortocircuito se debilita el flujo magnético  $\phi$ , porque la intensidad de excitación  $I_{exc}$  cae, al hacerlo la tensión en bornes.

Comparativa de las 3 excitaciones, Fig. 21:

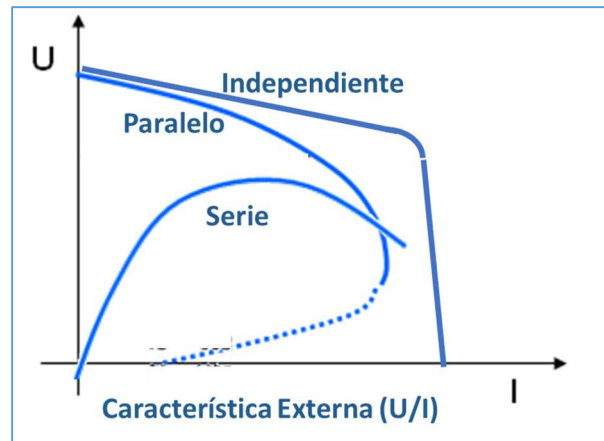


Fig. 21: Comparativa 3 excitaciones, Dinamo. Fuente: (Sancho, 2021), <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>

En las máquinas de excitación compuesta o Compound, se combinan los comportamientos serie y paralelo, al montar los dos sistemas, en proporciones adecuadas a la aplicación.

### 2.3.3 Controladores de campo de las dinamos

Son sistemas electromagnéticos, electromecánicos, o electrónicos que procuran mantener la tensión en bornes, actuando sobre la corriente de excitación del campo magnético, al detectar cambios en la corriente suministrada por la dinamo.

A menudo en la industria, requerimos de las máquinas, variaciones importantes de par y velocidad, dependiendo de la aplicación que el motor deba soportar, pudiendo ser tanto pares débiles a alta velocidad, como fuertes pares a baja velocidad.

En cualquier caso y para evitar fatiga en las transmisiones mecánicas y en la propia máquina de corriente continua, es de suma importancia un arranque suave y progresivo de la carga, siempre que la aplicación lo permita.

Para controlar el par y la velocidad de las máquinas de corriente continua, necesitamos regular tanto el campo magnético como la corriente rotórica. Para ello se requieren equipos electrónicos.

Estos equipos controlan la corriente rotórica en función del par a consignar y la estática en función de la velocidad que tienen que alcanzar.

A la función de control de la velocidad se la denomina “control de campo”, en alusión al control del campo magnético del estator.

Se dice que se debilita el campo, cuando se reduce la corriente de excitación  $I_{exc}$ , y por tanto se reduce la FEM.

Por el contrario “reforzar el campo”, significa incrementar la corriente de excitación  $I_{exc}$  y en consecuencia aumentar la FEM.

Hay dos formas de controlar la corriente de excitación en dinamos de corriente continua:

- Mediante Reostatos de arranque.
- Mediante Choppers.

#### **Reostatos**

Se instala una resistencia variable en serie con el bobinado, lo que provocará una caída de la tensión disponible del mismo, que hará disminuir la corriente de excitación, para que la fuerza electromotriz se reduzca. Penaliza energéticamente, pues la energía disipada en la resistencia serie de control, se pierde en forma de calor.

## **Choppers**

Se reduce directamente el nivel de corriente, mediante dispositivos electrónicos llamados “Choppers”. Son más caros, pero resultan más eficientes y pueden incluir protecciones u otras funcionalidades.

Se trata de interruptores estáticos basados en las tecnologías de tiristores, GTO, o Transistores IGBT, Mosfet, que controlan en que momentos conducen o no la corriente.

Variando los tiempos de conexión y desconexión, se originará una señal de salida pulsante de forma cuadrada y de amplitud variable (PWM) “*Pulse Wide Modulation*”, cuyo valor medio es la tensión de salida equivalente.

## 2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LOS ALTERNADORES SÍNCRONOS

Los alternadores síncronos, son generadores rotativos de corriente alterna senoidal, con uno o más pares de polos. Permiten controlar la frecuencia  $f$ , mediante la velocidad de rotación del eje y la tensión  $U$  con la corriente de excitación del campo magnético.

En valores instantáneos, son válidas las fórmulas ya citadas de las máquinas rotativas de corriente continua CC.

La fuerza electromotriz  $E$ , depende directamente de la corriente de excitación  $I_{exc}$ . La frecuencia de la velocidad de rotación del eje de la máquina y de su número de pares de polos.

Se dice que la relación entre velocidad del alternador síncrono y la frecuencia es del tipo rígido, ya que son directamente proporcionales:

$$n=60 * f/p$$

**Ecuación ( 13 ) Velocidad y Frecuencia máquina Síncrona en rpm.**

$f$ , es la frecuencia en Hz

$n$ , es la velocidad en rpm.

$p$ , es el número de pares de polos.

En términos de velocidad angular sería:

$$\omega= 2*\pi*f/p$$

**Ecuación ( 14 ) Velocidad y Frecuencia máquina Síncrona en radianes.**

$\omega$ , es la velocidad en rad/s

A mayor velocidad se vea arrastrada la máquina síncrona, mayor será la frecuencia de la tensión suministrada.

El motor primario que arrastra al generador, controla su velocidad de rotación para mantenerla lo más constante posible.

El circuito equivalente de un alternador síncrono, debe incluir las reactancias inductivas, pues se trata de corriente alterna.

La corriente alterna trifásica, se puede modelizar de la siguiente manera Fig. 22:

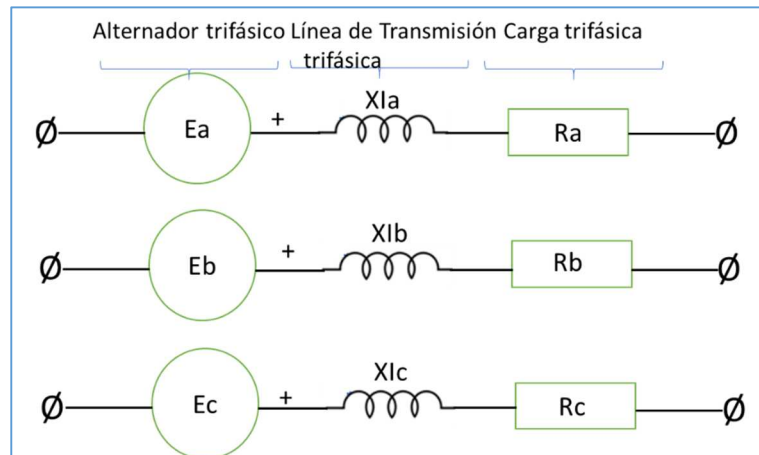


Fig. 22 Circuito equivalente de la corriente trifásica senoidal simétrica. Fuente: Propia.

Se representan tres fuerzas electromotrices senoidales generadas  $E_{a_a}$ ,  $E_{b_b}$  y  $E_{c_c}$  de idéntico valor RMS pero desfasadas entre sí respectivamente de  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . Sus respectivas corrientes senoidales  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  y las impedancias internas por fase  $Z_a$ ,  $Z_b$  y  $Z_c$ .

La suma de las corrientes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  en un sistema senoidal, simétrico y equilibrado, suma 0

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 0$$

**Ecuación ( 15 ) Suma de corrientes senoidales por fase en un circuito equivalente trifásico simétrico.**

Aunque suelen ser trifásicos, el circuito equivalente se reduce a monofásico siempre que disipen las energías equivalentes Fig. 23:

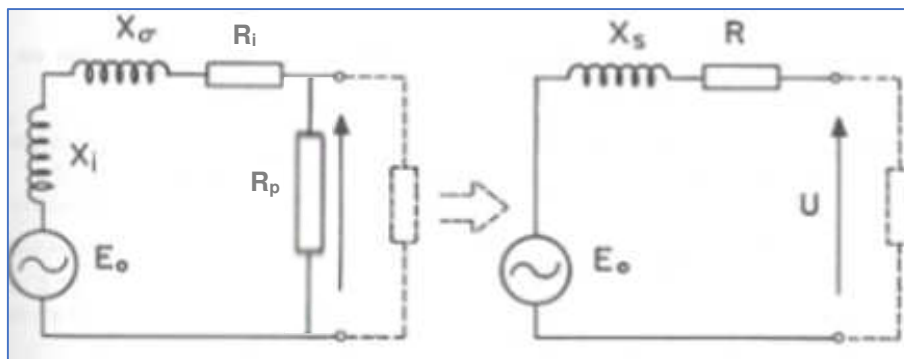


Fig. 23: Circuito equivalente de un alternador síncrono. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias).

Como vemos, una máquina síncrona se puede representar por una fuente de fuerza electromotriz alterna, con tensión eficaz  $E_o$ , en serie con las reactancias  $X_i$  y  $X_\sigma$  y la resistencia  $R_i$ .

$X_i$  es la reactancia principal o reactancia de reacción de inducido.

$X_\sigma$  es la reactancia de dispersión del inducido.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

En la figura de la derecha arriba, se han englobado las dos reactancias en una sola  $X_s$ , llamada reactancia síncrona convencional. Obliga al cálculo fasorial de magnitudes eléctricas y genera una caída de tensión interna del orden del 33% de la tensión nominal.

La resistencia  $R$ , en máquinas de cientos de kVA, suele ser baja y la caída de tensión  $R \cdot I$  del orden del 1 % de la tensión nominal.

Las capacidades parasitas a frecuencias del orden de 50 Hz, resultan despreciables y no se consideran en la figura.

Igual que en el caso de las dinamos, la resistencia en paralelo, debe incluir las pérdidas mecánicas, de ventilación y el arrastre de las excitatrices, así como las pérdidas internas en el cobre de la excitación y en el hierro.

Este escenario teórico, deben matizarse en la actualidad, debido a que las cargas no lineales o controladas electrónicamente, deforman las senoides generadas por los alternadores. Estas senoides deformadas con componentes armónicos, pueden no sumar cero en las tres fases de tensión o corriente. Acaban circulando por el conductor de neutro, que puede recalentarse, si no se han tenido en cuenta estas corrientes.

## 2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

En este tipo de máquinas rotativas, se produce una inducción del campo magnético estatórico en el rotórico. Esta acción es similar a la que se produce en un transformador, donde se induce una tensión de un primario en un secundario. Por esta razón el circuito equivalente se puede asimilar al de un transformador.

La potencia mecánica entregada por el eje en forma de par  $\Gamma$  y velocidad  $\omega$ , se modeliza por potencia disipada en las resistencias de carga, que tienen un valor óhmico función del deslizamiento en la velocidad del eje respecto a la de sincronismo.

Reducimos así el circuito secundario al primario mediante la sustitución del rotor del motor de inducción por otro equivalente, de igual número de fases, espiras por fase y factor de devanado Fig. 24.

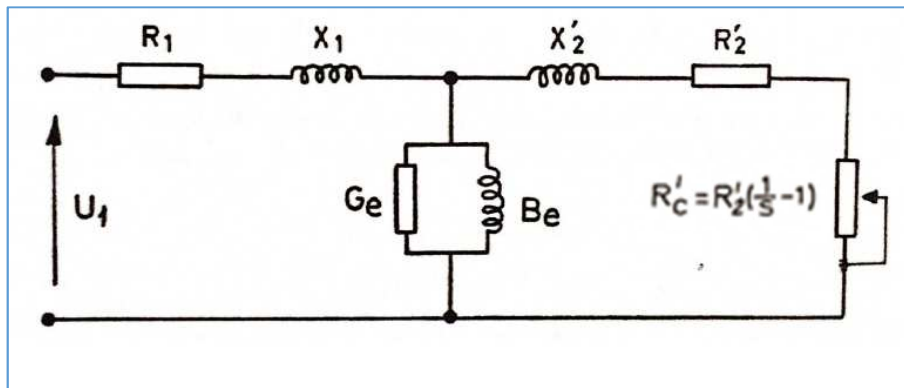


Fig. 24: Circuito equivalente, exacto, de una máquina rotativa de inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias).

Las magnitudes del rotor, reducidas al primario, las representaremos con la misma letra representativa y una tilde, como se hace en el estudio de transformadores.

El circuito equivalente de un motor de inducción por fase de esta manera, es el siguiente:

Donde:

$U_1$ , es la tensión de alimentación aplicada por fase del estator.

$R_1$ , es la resistencia por fase del estator.

$X_1$ , es la reactancia de dispersión parcial primaria o estatórica.

$X_2$ , es la inductancia por fase del rotor, reducida al estator.

$R_2$ , es la resistencia por fase del rotor, reducida al estator.

$R'_c$ , es la simulación de la carga, su valor óhmico es función del deslizamiento:  $R'_2 * ((1/s)-1)$

$G_e$ , es la resistencia equivalente que agrupa las pérdidas en el hierro o sistema magnetizante (corrientes parásitas, histéresis).

$B_e$ , es la inductancia magnetizante.

Este circuito equivalente, se puede simplificar al que se muestra en Fig. 25, en el cual la corriente de excitación  $I_{1e}$ , estando directamente alimentado por la tensión  $U_1$ , se conserva constante para cada tensión en bornes e independientemente de la corriente de carga.

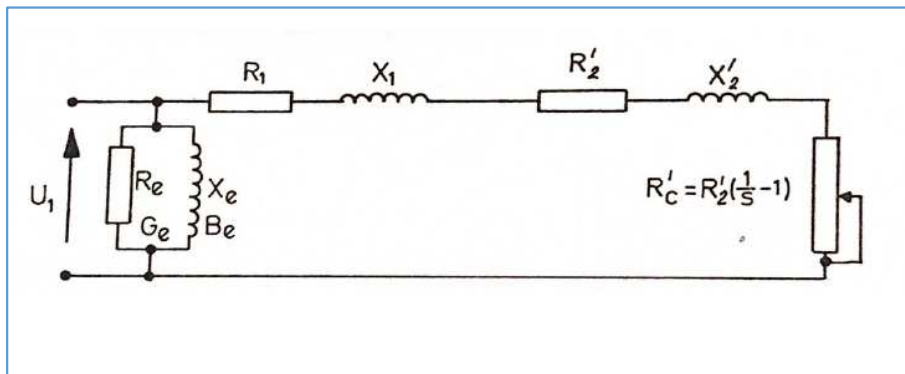


Fig. 25: Circuito Equivalente aproximado, Motor de Inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias).

La fórmula modeladora de la potencia útil disipada en la resistencia equivalente de la salida mecánica sería:

$$P_{\text{util}} = T * \omega = R'_c * I^2$$

**Ecuación ( 16) Potencia útil Motor de inducción**

Como en cualquier transformador, hay una resistencia y una auto inductancia en los devanados primarios que representamos por  $R_1$  y  $X_1$  y en los secundarios por  $X'_2$  y  $R'_2$ . El flujo de la máquina está relacionado con el voltaje aplicado  $U_1$ . En este caso de motores de inducción, al existir un entrehierro, aumenta la reluctancia de la trayectoria del flujo, lo que debilita el acoplamiento entre primario y secundario. Esta mayor reluctancia nos obliga a aumentar la corriente de magnetización, para mantener el mismo nivel de flujo, por esta razón la reactancia de magnetización  $X_\mu$  de la rama paralelo, será inferior que la de un transformador.

La resistencia paralelo  $R_e$ , modela las pérdidas en el hierro de estator y rotor.



## 2.6 CONCLUSIONES DE APLICACIÓN

Las reactancias internas de todas las fuentes de tensión tratadas, no deben despreciarse en absoluto, pues generan caídas de tensión internas significativas. Estas caídas provocan los llamados “Huecos de Tensión”.

Las maquinas rotativas permiten compensar las caídas de tensión internas, con estrategias adecuadas de control de la corriente de excitación.

En el caso de los alternadores, la reactancia síncrona está cercana al 33% de caída de tensión interna, (en transformadores es del 5%), pero sus ventajas tecnológicas las hacen la fuente de electricidad más fiable a potencias de MW.

El control de la frecuencia del alternador, corre a cargo del fluido que alimenta el motor primario que arrastra al alternador.

En el momento del arranque del conjunto, se almacena una elevada energía cinética de rotación en las masas rodantes del motor térmico y del alternador. Esta energía cinética, con un adecuado sobredimensionamiento del alternador, se transforma en electricidad, pudiendo suministrar corrientes transitorias elevadas, muy útiles para el arranque de motores de inducción, como los transversales de proa, sin sobredimensionar el motor Diesel.

Esta tesis propone una alternativa viable, adecuada para instalaciones donde no se ha sobredimensionado suficientemente el alternador, a fin de poder suministrar las corrientes transitorias necesarias para el arranque de cargas concretas, durante algunos segundos. (Bolund, Bernhoff and Leijon, 2007)

El control de la tensión del alternador, (Tterjee and Mukherjee, 2016)se gobierna mediante la corriente de excitación de su campo magnético. La regulación por tensión solamente, no es la más apropiada para el arranque de motores de inducción, pues debe realimentar también la corriente  $I$  y sus derivadas.

El controlador debe alimentarse de una fuente de energía diferente a la suministrada por los bornes del alternador, para no tener una respuesta parecida a la de la dinamo con excitación en paralelo, pues puede quedar sin tensión, durante de un corto impulso de corriente, que lleva la  $U_b$  a cero.

Es deseable acercarse en esta estrategia, a la de la dinamo con excitación compuesta, ya que, de esta forma, siempre contará con el adecuado porcentaje de excitación, proporcional a la corriente de carga. Solo esta configuración, puede mantener una corriente elevada en condiciones transitorias de cortocircuito, lo cual es imprescindible para alimentar redes que contienen motores de inducción.

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Los alternadores síncronos comerciales de calidad, no superan las tres veces su corriente nominal en condiciones de cortocircuito. Recordemos que un motor de inducción parado es casi un cortocircuito, y durante el transitorio de arranque, consume una corriente de 7 veces su corriente nominal  $I_n$ .

Un alternador comercial con su control de tensión adecuadamente alimentado y con la mejor tecnología, no puede arrancar correctamente motores de inducción de más de la mitad de su potencia nominal.

Independizar las cargas eléctricas delicadas del alternador principal, aporta muchas ventajas de explotación, sobre todo cuando se alimentan cargas o consumos muy variables en el tiempo. (Castillo and Marrufo, 2010)

### 3 ALTERNADORES

Los alternadores, generalmente utilizados en buques para su generación de energía eléctrica, son del tipo síncrono, que pasamos a describir a continuación.

#### 3.1 ALTERNADORES SÍNCRONOS

##### 3.1.1 Descripción

Los alternadores síncronos, son máquinas eléctricas rotativas, que al igual que las de corriente continua y las de inducción, constan de un devanado inductor y de uno de inducido, ligados por un campo magnético.

Las máquinas síncronas tienen el devanado inductor, alimentado por corriente continua, en el rotor, también llamado “Rueda Polar”, y el inducido en las ranuras del paquete magnético del estator. (Elgerd, 1981)

La rueda polar está alimentada por corriente continua, cuya magnitud define la corriente de excitación. La velocidad de giro, origina la pulsación de las tensiones alternas del estator, que deben multiplicarse por el número de pares de polos para obtener la frecuencia. (Pernía, 2014)

$$n_s = 60 \cdot f / p$$

$n_s$  velocidad de sincronismo en rpm,  
 $f$  en Hz y  $p$  nº de pares de polos.

**Ecuación ( 17 ) Velocidad Sincrónica  $n_s$  rpm.**

El circuito magnético de la rueda polar, dependiendo de la velocidad a la que gire, puede ser de polos salientes o cilíndrico, este último es más robusto para las altas velocidades asociadas a pocos pares de polos. Un par de polos a 50 Hz, tiene una velocidad de sincronismo de 3000 rpm.

En este caso de polos salientes, a fin de lograr que la onda de inducción a lo largo del entrehierro, sea lo más senoidal posible y para reducir al mínimo el contenido y amplitud de los armónicos de la f.e.m. inducida, es fundamental el correcto diseño de las expansiones polares. Para ello se construye la máquina con entrehierro variable, aumentándolo gradualmente desde el centro del polo hacia los extremos.



Fig. 26: Sección transversal de rotores de alternador síncrono trifásico de polos salientes, 2 pares de polos a 50 Hz, velocidad de sincronismo 1500 rpm. Fuente: Fundamentos de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Laguna, Departamento de Ingeniería industrial

## Alternadores

### 3.1.2 La máquina síncrona funcionando como generador y como motor

Al igual que el resto de máquinas eléctricas rotativas, las máquinas síncronas pueden funcionar tanto como motores de corriente alterna, motor síncrono, como generadores de corriente alterna monofásicos o polifásicos, alternadores síncronos. (Gao, Wang and Zhang, 2010)

La máquina síncrona, es un convertidor electromecánico rotativo de corriente alterna, excitado por corriente continua, o por imanes permanentes, cuyo funcionamiento tiene una relación rígida entre:

Frecuencia de la corriente del inducido.

Velocidad de rotación.

Número de polos.

Dependiendo del número de fases del devanado del inducido, las máquinas síncronas son monofásicas o polifásicas.

En el caso de una máquina síncrona acoplada a una red de potencia infinita, su funcionamiento como motor o como alternador, dependerá del sentido del par que su eje transmite. Como motor será el par en el eje de la máquina síncrona, en el mismo sentido que la velocidad de rotación. Como generador, el par de la máquina síncrona, resulta contrario al sentido de la velocidad de rotación y debe ser arrastrado por un motor primario. Este par va asociado a la corriente que circula por el estator. Hay que recordar que la frecuencia viene marcada por la red, que definirá la velocidad de sincronismo  $n_s$ .

El funcionamiento como motor o como alternador de una máquina síncrona, depende de cómo la f.e.m.  $E$  está desfasada respecto a la tensión en bornes  $U$ , si lo está en avance trabaja como generador y si retrasada como motor. (sentido antihorario positivo)

En el diagrama fasorial Fig. 30, se representa para la máquina síncrona de rotor cilíndrico, la f.e.m.  $E$ , la tensión en bornes  $U$  y la corriente  $I$ .

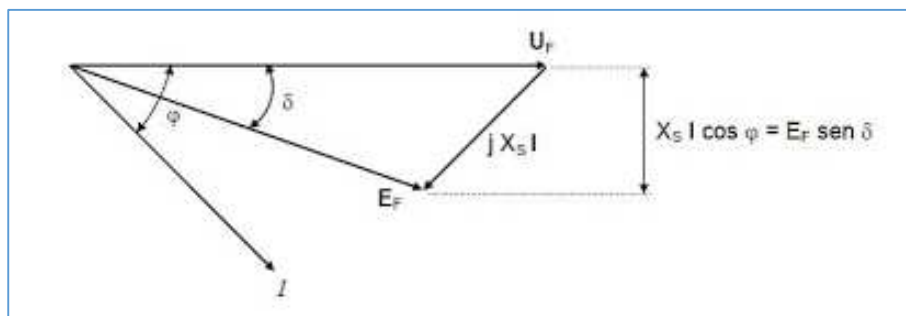


Fig. 27: Diagrama fasorial de tensiones de una máquina síncrona trabajando como Motor. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias)

Cuando el ángulo  $\varphi$  (entre U e I) es positivo, se dice que la máquina síncrona esta sobreexcitada y si es negativo subexcitada. En este caso está subexcitada.

## Alternadores

### 3.1.3 Regulación de la Frecuencia

La frecuencia de la tensión del alternador está regulada por el aporte de combustible a la máquina térmica que lo arrastra.

Responde de forma más lenta que la regulación de tensión (AVR), debido a las inercias mecánicas de ambas máquinas, unas 1000 veces menos.

### 3.1.4 Regulación de la excitación del campo magnético, (AVR)

La excitación por imanes permanentes, permite alternadores más pequeños, pero incapaces de regular la fuerza magneto motriz f.m.m., para compensar las caídas de tensión internas del alternador, originadas por las cargas variables.

La corriente de excitación del sistema inductor, debe poder regularse para mantener constante la tensión en bornes del alternador, aunque la carga varíe, compensando las caídas de tensión internas del alternador.

Para que el regulador maneje corrientes más pequeñas que los de la rueda polar del alternador, suele montarse una dinamo excitatriz, de baja tensión, directamente acoplada al eje de la máquina síncrona, que alimenta solo a la rueda polar. Actúa pues, como un amplificador electromecánico de la corriente de excitación.

Esta excitatriz, que se alimenta en paralelo con el devanado inducido de la dinamo, arranca por magnetismo remanente y permite regular la corriente de excitación del alternador, actuando sobre la excitación de la excitatriz.

Esta estructura de excitación, se denomina “autoalimentada” y presenta comportamientos mediocres en la zona de cortocircuito del alternador, porque el regulador pierde la tensión disponible para aumentar la corriente de excitación de la excitatriz, debido a las caídas internas de tensión de la excitatriz cuando suministra las corrientes máximas.

Esta dinamo excitatriz autoexcitada, mejora sus prestaciones transitorias, si se excita con algún sistema en serie o compuesta “*compound*”, con la corriente principal del alternador, cosa no siempre fácil. Se considera fuera del alcance de este trabajo, describir con detalle, los diversos sistemas que se encuentran en el mercado.



## Alternadores

Para la excitación independiente necesitamos una segunda excitatriz, que se denomina excitatriz piloto, excitada por imanes permanentes.

Esta configuración suele ser la de mejores prestaciones ante sobrecargas y cortocircuitos. Las excitatrices en general, permiten manejar corrientes más pequeñas en los reguladores que las gobiernan, pero introducen un tiempo de respuesta más largo.

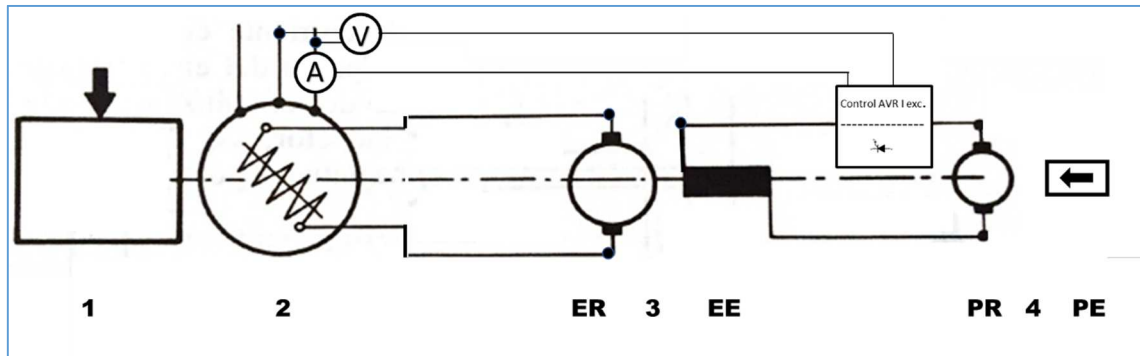


Fig. 28: Excitación independiente de una máquina síncrona, alternador. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

En la Fig. 28 vemos:

- 1 máquina térmica.
- 2 máquina síncrona.
- 3 excitatriz: EE (Excitatriz Estator) y ER (Excitatriz Rotor).
- 4 excitatriz piloto excitada por imanes permanentes: PE (Piloto Estator) y PR (Piloto Rotor).

Para conseguir alimentar a la rueda polar, se utilizan dos anillos rozantes aislados, con sus correspondientes escobillas y calados sobre el mismo eje.

La evolución tecnológica ha permitido mejorar el sistema de excitación, una primera solución ha sido sustituir la dinamo, por un alternador de inducido móvil y un puente rectificador montado sobre el propio rotor, pasándose a denominar “Alternadores Síncronos sin escobillas”, o “*Brushless*”, eliminando así los anillos rozantes y las escobillas, y su correspondiente mantenimiento.

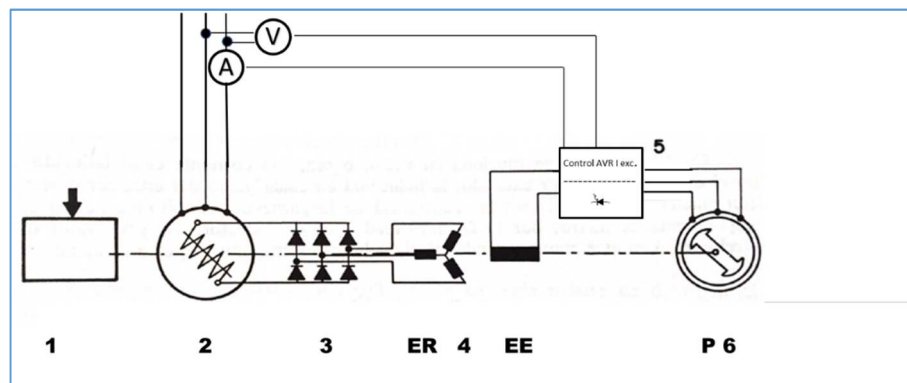


Fig. 29: Excitación “sin escobillas” de una máquina síncrona, alternador. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

El detalle de la Fig. 29 es:

- 1 máquina térmica.
- 2 máquina síncrona.
- 3 puente trifásico rectificador.
- 4 excitatriz principal de C.A. de inducido móvil. (EE Excitatriz Estator y ER Excitatriz Rotor).
- 5 puente rectificador controlado, realimentado por Tensión e Intensidad del alternador.
- 6 excitatriz piloto trifásica de imanes permanentes

Un sistema de excitación más económico y de menores prestaciones transitorias, consiste en la posibilidad de lograr la autoexcitación del alternador, alimentando el control o AVR, desde bornes del propio alternador Fig. 30.

Las barreras de potencial de los interruptores electrónicos del controlador, no permiten el paso de la corriente inicial, que suele “cebar” los generadores autoalimentados, debido al magnetismo remanente de la rueda polar.

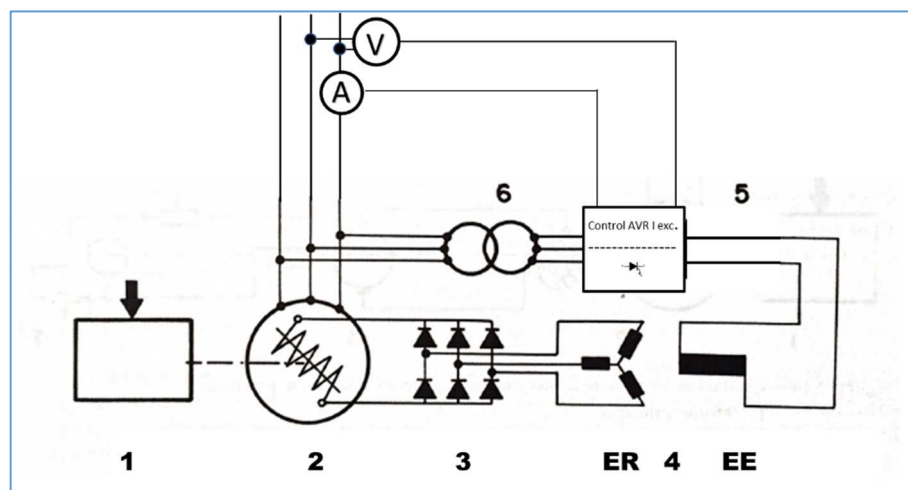


Fig. 30: Autoexcitación de una máquina síncrona, alternador. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

El “cebado” del conjunto, se consigue, alimentando la excitación por una fuente externa de CC durante algún segundo de tiempo.

El detalle de la figura de arriba es:

- 1 máquina térmica.
- 2 máquina síncrona.
- 3 puente trifásico rectificador a diodos en el rotor

## Alternadores

- 4 excitatriz principal de C.A. de inducido en el rotor. (EE Excitatriz Estator y ER Excitatriz Rotor).
- 5 puente rectificador controlado, realimentado por Tensión e Intensidad del alternador.
- 6 transformador de aislamiento galvánico.

### 3.1.5 Reacción de inducido

Reacción de inducido es la deformación del campo magnético generado por el inductor, cuando la maquina síncrona está en carga y circula corriente por el inducido. Esta corriente circulando por el devanado inducido, provoca una segunda fuerza magneto motriz, que debe sumarse fasorialmente con la del devanado inductor, dando un campo resultante en otra dirección y magnitud.

La consecuencia es que, trabajando ya sea como motor o como alternador, su tensión en bornes difiere de la f.e.m. inducida, en valor y fase o solamente en fase, debido a la corriente que circula por el inducido. El controlador de la corriente de excitación del inductor, debe ajustar su valor para compensar el efecto de esta segunda bobina inductora.

El retraso en fase entre la corriente y la fuerza electro motriz, evaluado mediante el coseno del ángulo que forman ( $\cos \varphi$ ), depende directamente de la impedancia de la carga, de tal manera que siendo esta resistiva el desfase será cero, si es inductiva será positivo y si es capacitiva será negativa.

Si observamos el máximo de tensión inducida por el rotor en el estator, vemos que una corriente en fase con la tensión, genera un campo magnético de reacción de inducido, a  $90^\circ$  geométricos del del campo inductor. De ahí que el ángulo de fase de la corriente en la carga, tenga la influencia desviadora citada sobre el flujo inductor resultante.

Se muestran en Fig. 31 y 32, por el interés en esta tesis, las gráficas de los casos de carga resistiva e inductiva pura:

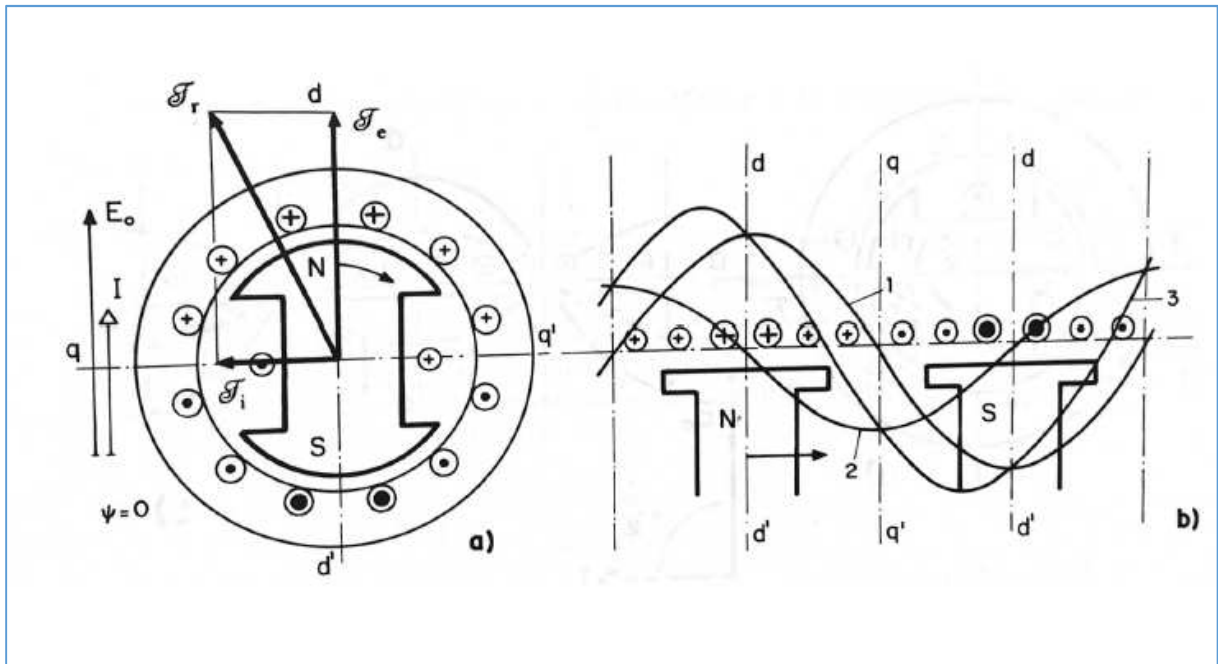


Fig. 31: Máquina Síncrona Trifásica con carga resistiva. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

En Fig. 31 parte **a**), vemos como como la corriente  $I$ , está en fase con la f.e.m.  $E_0$ . ( $\psi=0$ ).

En esta situación, la distribución de las corrientes estáticas, será la misma que la de las f.e.m.

En Fig. 31 parte **b**), vemos como onda fundamental de la f.m.m. de reacción de inducido  $\mathcal{F}_i$  (curva 2), esta retrasada en  $\pi/2$ , respecto a la fundamental del inductor  $\mathcal{F}_e$  (curva 1).

La reacción de inducido en una máquina síncrona, trabajando como alternador, con carga resistiva es transversal, similar a la de una dinamo con las escobillas, en la línea neutra geométrica y al igual que en estas máquinas, tenderá a reforzar la inducción en las extremidades de la salida de las piezas polares y a debilitarla a la entrada.

La resultante  $\mathcal{F}_r$ , (curva 3) del gráfico de arriba, queda desplazada en sentido contrario al de rotación, tanto por la f.m.m. de reacción de inducido, como por el fenómeno de saturación.

En este caso, el flujo principal será ligeramente inferior al de vacío  $\phi_0$ .

En el caso de carga inductiva, la imagen es Fig. 32:

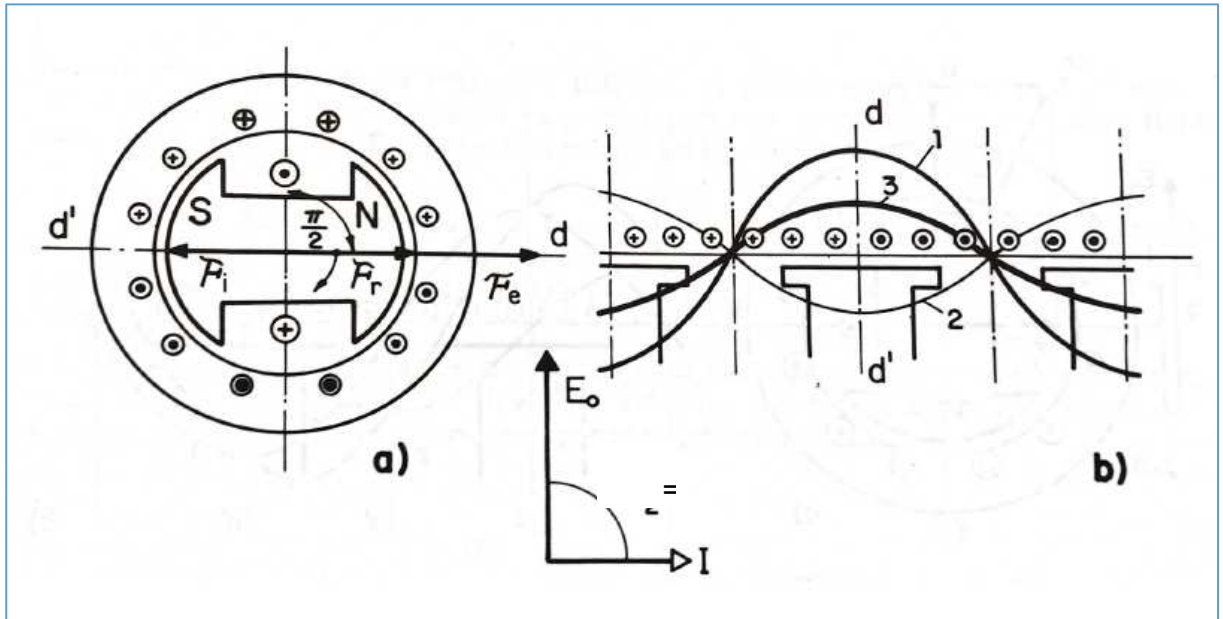


Fig. 32: Máquina Síncrona trifásica con carga inductiva. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

En la Fig. 32, vemos como como la corriente  $I$  está desfasada de la f.e.m.  $E_0$ . ( $\psi=+\pi/2$ ).

En esta situación la distribución de las corrientes en el estator, estará desplazada en el espacio el ángulo  $+\pi/2$ , respecto a las f.e.m.

En consecuencia, la corriente será nula en los conductores donde la f.e.m. es máxima y alcanzará el valor máximo, en los conductores donde la f.e.m. sea cero en vacío, parte **b**) de la gráfica de arriba.

La onda fundamental de la f.m.m. de reacción de inducido  $F_i$ , (curva 2), es opuesta a la onda de f.m.m. del rotor  $F_e$ , (curva 1). La resultante, (curva 3) es la fundamental.

La reacción de inducido en una máquina síncrona, trabajando como alternador, con carga inductiva es longitudinal y desmagnetizante.

### 3.1.6 Influencia y efectos de la saturación

A fin de maximizar el rendimiento de las máquinas eléctricas rotativas, la inducción en su entrehierro se diseña para ser muy alta, lo que produce una cercanía del punto nominal de operación, con el límite de saturación en el material ferromagnético, que influye en las características funcionales de la máquina, en los episodios de sobrecarga o cortocircuito.

La saturación marca el límite de costes de la máquina, pues alejarse del caso de saturación exigiría poner más hierro, encareciendo económicamente la máquina.

Si el modo de trabajo de la máquina concreta, exige hacer frente a sobrecargas frecuentes, como son los arranques de motores eléctricos alimentados por el generador, este puede sobredimensionarse para que el hierro trabaje más desahogado y la tensión resulte más estable. Este sobredimensionado, muy habitual en los grupos electrógenos de emergencia terrestres, no es habitual a bordo, por cuestiones de tradición, a pesar de que el motor de la hélice de proa, suele presentar un arranque severo, para las plantas que lo alimentan, desestabilizándolas en algunos casos.

La característica magnética de una máquina eléctrica, o su equivalente la característica de vacío, nos muestra, Fig.33, como la f.e.m. inducida en vacío  $E_0$ , crece linealmente con la f.e.m. de excitación, mientras el circuito magnético no está saturado, y se curva cuando se inicia la saturación del mismo. Esta curvatura resta eficacia al devanado de excitación, pues un incremento de la corriente de excitación dado, genera un incremento de tensión generado menor. El controlador entonces, puede ver imposibilitada su función, desde el momento del diseño de la planta, si esto no se ha tenido en cuenta.

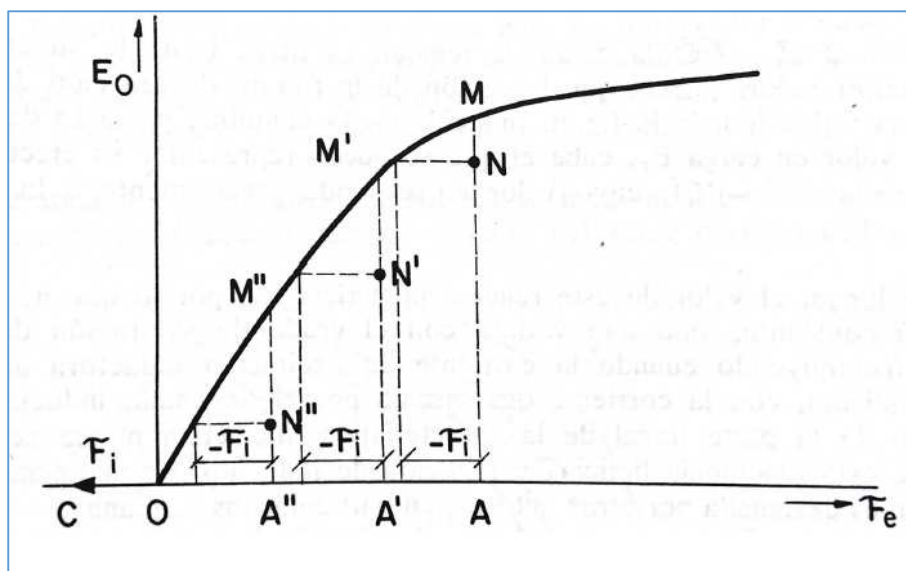


Fig. 33: Variación de la saturación sobre el efecto de una misma f.m.m. sobre distintas f.m.m. de excitación. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

## Alternadores

En una máquina síncrona funcionando en carga, sus condiciones magnéticas vienen prefijadas por la f.m.m. de excitación inductora y la f.m.m. de reacción de inducido.

El segmento de abscisas OA representa la f.m.m. de excitación, que corresponde a una f.e.m.  $E_0$  representado por AM.

La reacción de inducido  $\mathcal{F}_i$  desmagnetizante, representada por el segmento OC, reduce la f.e.m. inducida en el valor MN, siempre que la máquina esté trabajando en el punto M; cabe destacar que, en función del punto de trabajo de la máquina, una misma f.m.m. desmagnetizante puede producir reducciones mucho mayores, ver  $M'$  y  $M''$  y sus correspondientes reducciones  $M'N'$  y  $M''N''$ , cada vez mayores.

de tal modo que:

$$\mathcal{F}_r = \mathcal{F}_e - \mathcal{F}_i$$

**Ecuación ( 18 ) Reacción de inducido resultante como resta de la de excitación y la de inducido.**

(Dudgeon *et al.*, 2007; UNED de la asignatura “Centrales Eléctricas”, 2008), (Ortiz-Quisbert *et al.*, 2016; Pacheco and Moncada, 2017), (Samra and Islam, 1995), (Vargas, 2013) , (Giraldo Buitrago, Bolaños Ocampo and Correa Flórez, 2006; Gomes and Chabu, 2010), (PES, 2006; Payvand and Hosseini, 2019).

Este fenómeno, suele ser el responsable de algunas caídas de planta a bordo. Algunos diseñadores no tienen en cuenta, que el motor de la hélice transversal de proa, durante su arranque, que puede durar algunos segundos, absorbe de la planta que lo alimenta, corrientes fuertemente inductivas, próximas a las de cortocircuito.



### 3.1.7 Alternadores síncronos acoplados en paralelo

#### 3.1.7.1 Maniobras de acoplamiento

Para acoplar dos máquinas síncronas en paralelo, se requieren ciertas precauciones en la maniobra de interconexión, que pasamos a detallar:

- Las tensiones de los alternadores a acoplar, deben ser iguales en valor eficaz, coincidir en número de fases y secuencia de las mismas. Esta correcta secuencia de fases, se requiere comprobar la primera vez que se va a acoplar.
- Las frecuencias también deben ser iguales. A verificar cada vez que se acople.
- Las tensiones de la máquina síncrona y de la red a acoplar deben estar en fase. A verificar cada vez que se acople.

Se muestra Fig. 34, las oscilaciones de la tensión resultante, que aparecen en el interruptor de acoplamiento entre dos alternadores síncronos, antes de cerrarlo, siendo las tensiones eficaces iguales y existiendo una pequeña diferencia entre las frecuencias.

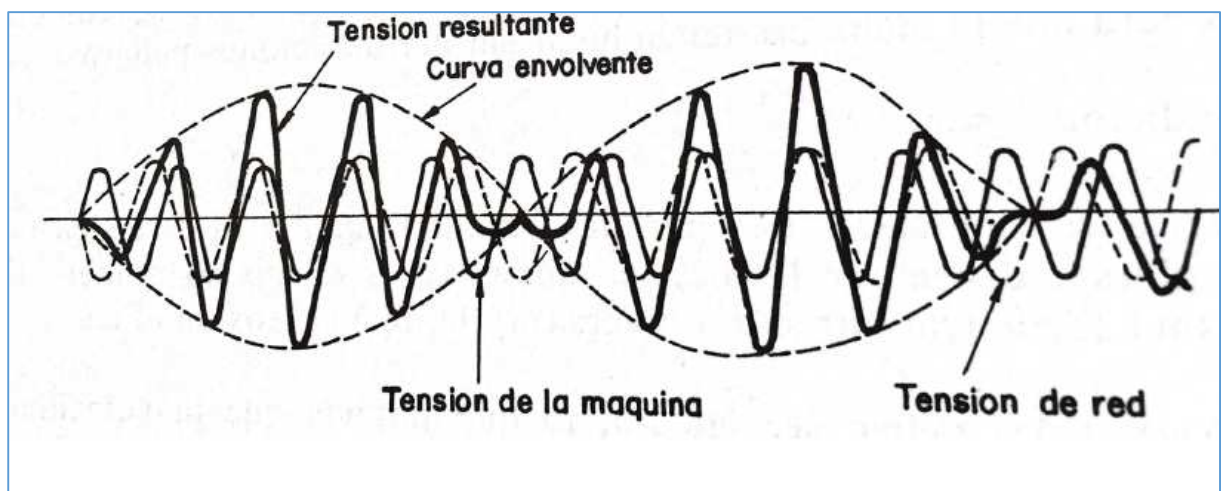


Fig. 34: Tensión resultante en el interruptor de acoplamiento abierto, de una máquina con la red teniendo diferentes frecuencias. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Se observa como la tensión resultante, varía desde un máximo, que es suma de los valores instantáneos de las tensiones de cada alternador, cuando están en fase, a un mínimo que es la resta de los valores instantáneos, cuando están en contrafase.

La frecuencia de la envolvente de esta tensión observable en el interruptor de acoplamiento antes de cerrarlo, es:

$$f_s = f_1 - f_2$$

Ecuación ( 19 ) Frecuencia de la envolvente de la tensión que aparece en el interruptor abierto de acoplamiento entre dos máquinas síncronas de diferentes frecuencias.



## Alternadores

Siendo  $f_s$  el “desvío de frecuencia” y  $f_1$  y  $f_2$  las frecuencias de la máquina y de la red respectivamente.

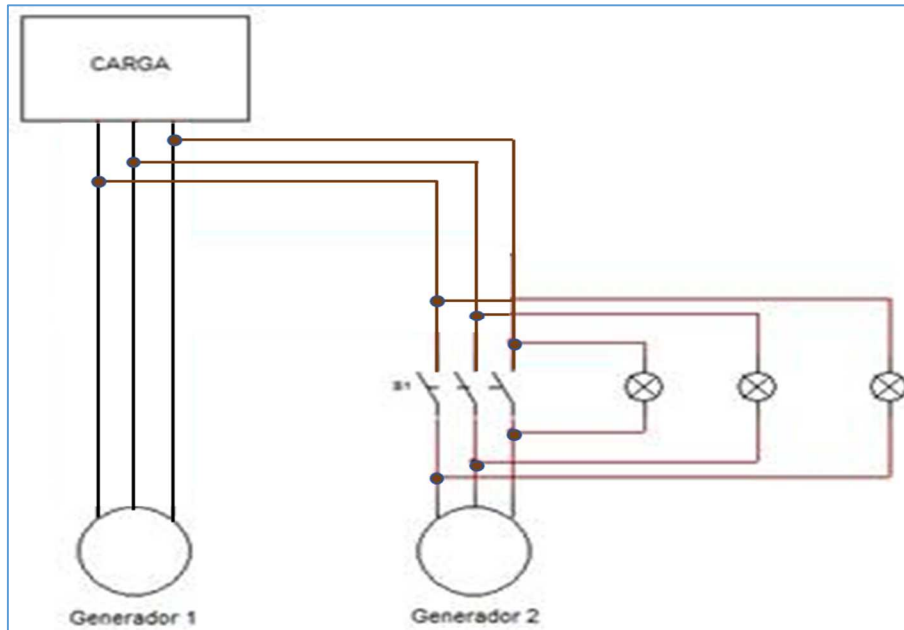


Fig. 35: Sincronoscopio de tres lámparas. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Para la correcta sincronización, se requiere de un sistema de medida o indicación, que nos permita acoplar con seguridad. El más simple, para instalaciones pequeñas es el sincronoscopio de tres lámparas, conectadas entre los bornes de cada fase del interruptor de conexión Fig. 35.

Primero se ajusta la corriente de excitación para igualar las tensiones.

Segundo se regula la velocidad del motor primario para igualar las frecuencias.

A medida que las dos frecuencias se igualen, las oscilaciones de intensidad luminosa de las lámparas se harán cada vez más lentas.

Cuando se apaguen las tres lámparas, es el momento oportuno de acoplar.

Si las lámparas no oscilan en sincronismo, eso indica que las fases no tienen el mismo orden o secuencia, y debe detenerse el proceso para cambiar, dos de las tres fases entre sí, en la interconexión entre alternadores, hasta alcanzar el sincronismo de destello.

Este sistema es aconsejable en la primera conexión entre alternadores, en el proceso de montaje de la instalación.

Cuando se conectan las tres lámparas entre los bornes simétricos de entrada y salida del interruptor de conexión, es recomendable que sean del doble de la tensión nominal de los alternadores, para resistir el momento en que sus tensiones se suman.

Al ser lámparas de funcionamiento efímero, es posible que resistan, pero deslumbran al operador.

Para ganar precisión en el momento de la sincronización, se usa otro sistema, cuyo esquema se detalla en la Fig. 36 y 37, en que se cruzan dos lámparas (2 y 3). La sincronización debe realizarse cuando 1 esta apagada, con 2 y 3 luciendo con la misma intensidad.

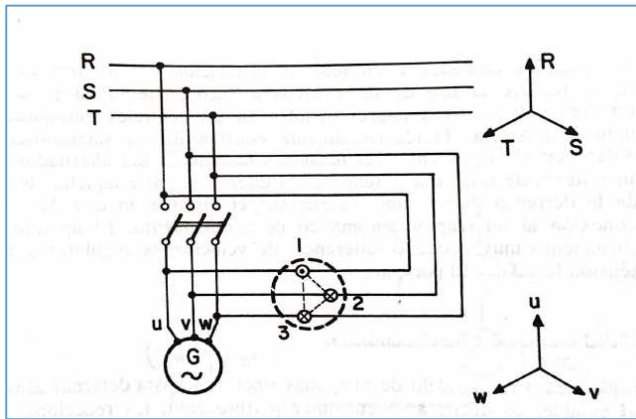


Fig. 37 Conexiones para el acoplamiento en paralelo con sincronoscopio. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).



Fig. 36: Disposición de las lámparas. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

La secuencia de destellos 1 2 3, dextrógira-levógira, nos orienta también sobre si al alternador que queremos acoplar va más deprisa o más despacio. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991).

El sistema de regulación de tensión y frecuencia de un alternador, se ve profundamente afectado por el hecho de sincronizarlo a otro alternador, o a una red, porque las magnitudes a controlar en los bucles de realimentación del controlador, son diferentes y pueden no estar preparados para resistir ese modo de operación, si está diseñado para trabajar solo.

Tabla 4 Alternador en modo isla y conectado a una red infinita. Parámetros que gobiernan los diferentes controladores.

	Alternador Aislado	Alternador en Red
Control de Combustible Motor Primario	Frecuencia $f$	Potencia $P$
Control de Excitación del Alternador	Tensión $V$	Reactiva $Q$

Un alternador con controlador de tensión diseñado para trabajar en isla, posiblemente no actuará correctamente acoplado a otro alternador de diferente potencia, porque estará realimentando la tensión en bornes del alternador y debería estar realimentando la potencia eléctrica suministrada a la red.

Los controladores de frecuencia-potencia  $f$ - $P$ . (combustible del motor primario) y tensión-reactiva  $V$ - $Q$ . (corriente de excitación del alternador), deben saber en todo momento, si están aislados

## Alternadores

o trabajando en red, para realizar correctamente su función, y que tecnológicamente estén igualmente preparados para esos dos modos de trabajo.

### 3.1.7.2 La máquina síncrona acoplada a una red de potencia infinita

Cuando las aportaciones de potencia  $P$  y reactiva  $Q$  del sistema que se conecta, no afectan significativamente los valores de  $f$  y  $V$  de la red, se dice que es de potencia infinita.

El acoplamiento de una máquina síncrona a una red infinita, es un caso particular de acoplamiento de alternadores, en el que la red infinita permanece prácticamente constante, tanto en tensión en bornes, como en frecuencia.

## Alternadores

### 3.1.8 Potencias activas.

El combustible consumido es el elemento de control de la potencia activa de cada alternador, pues genera el par que le aporta el motor Diesel que lo arrastra, para vencer el par resistente asociado a la corriente, que transporta la potencia activa generada.

El regulador de velocidad, cuando están aislados, es el protagonista, pues el combustible aportado controla la frecuencia, gobernada por la velocidad de rotación.

Dependiendo de la posición en que el regulador de combustible de cada motor primario se encuentre, las potencias de los alternadores acoplados se repartirán de formas diferentes. Aquí los parámetros de los reguladores, curvas de respuesta, estatismos y otros, tienen una importancia fundamental.

El grupo electrógeno, cuyo regulador de potencia ascienda, incrementará el aporte de combustible y en consecuencia su potencia, a expensas del resto, que reducirán su aportación al sistema, si la carga permanece constante y los reguladores actúan sin restricciones.

Para un reparto proporcional a sus respectivas potencias, sus reguladores de combustible deberán tener el mismo estatismo (variación total de la frecuencia de vacío a plena carga) y estar ajustados para la misma frecuencia en vacío.

El reparto de potencias suele realizarse desde la central de control, de cada grupo electrógeno o conjunto Motor Térmico-Alternador, observando los vatímetros de cada unidad generadora y el frecuencímetro que actúa de consigna general a seguir. Las posiciones relativas de los reguladores de combustible, pueden variarse por los operadores expertos, si las circunstancias de operación así lo aconsejan, añadiendo restricciones de regulación.

En realidad, actúan sobre el par aportado por el motor primario, pues la velocidad es la misma en todos los alternadores acoplados.

En un sistema con varios alternadores acoplados a una red de potencia infinita, la potencia activa se reparte en función del estatismo (pendientes de las curvas de regulación) de los reguladores de las máquinas primarias que utilizan las pequeñas oscilaciones de frecuencia alrededor de la consigna, para regular la potencia activa aportada al sistema, por cada máquina.

Un criterio habitual de explotación, es el de que cada máquina aporte al sistema una potencia proporcional a la potencia del motor Diesel.

### 3.1.9 Potencias reactivas.

La intensidad de corriente de excitación de cada alternador acoplado, determina el valor de la potencia reactiva que entrega o cede a la red.

Esta corriente de excitación en la práctica, viene ajustada por lo que llamamos regulador de tensión-reactiva,  $V-Q$ , que la inyecta directamente a la rueda polar o a través de la corriente de excitación de la excitatriz de cada alternador.

La característica externa de los alternadores síncronos aislados, muestra la variación de la tensión en bornes en función de la corriente que demanda la carga  $U=f(I)$ , manteniendo  $\cos \phi$  y corriente de excitación constantes. Tiene una caída de tensión en bornes, que va desde la de vacío sin consumo, hasta cero, punto en el que se dice que la máquina aporta la máxima corriente posible por su tamaño o corriente de cortocircuito.

Una máquina síncrona puede soportar la corriente de cortocircuito, durante bastantes segundos de tiempo, sin dañarse cuando esta fría. Si se desea mayor corriente de cortocircuito, hay que aumentar el tamaño del alternador, respecto a la potencia del Diesel que lo arrastra. Si se quiere arrancar correctamente un motor de inducción de potencia similar a la del Diesel, el alternador debe sobredimensionarse unas 2 a 3 veces, para poder hacer frente a la energía reactiva requerida en el arranque.

En un sistema con varios alternadores acoplados a una red de potencia infinita, la potencia reactiva se reparte en función del estatismo (pendientes de las curvas de regulación) de los reguladores de excitación de los alternadores, que utilizan las pequeñas oscilaciones de tensión alrededor de la consigna, para regular la potencia reactiva aportada al sistema, por cada máquina. Un criterio habitual de explotación, es el de que cada máquina aporte al sistema una potencia reactiva proporcional a la potencia eléctrica aparente de cada alternador.

Debido a la tecnología constructiva de los reguladores de ambos sistemas ( $f$ ,  $P$  y  $V$ ,  $Q$ ), su tiempo de respuesta resulta muy diferente. Ante un escalón de Potencia Activa consumida, el control de los inyectores del motor Diesel, tardan algunas décimas de segundo en ajustar el aporte de combustible a la nueva situación. En este tiempo la frecuencia se desvía de la consigna ligeramente, es la magnitud que las otras máquinas del sistema utilizan para repartirse la carga automáticamente.

Los controladores de excitación de los alternadores, reaccionan mucho más deprisa ante un escalón de reducción de la tensión en bornes en decimas de milisegundo. Este escalón de tensión, es típico durante el arranque de los grandes motores de inducción de la instalación, como pueden ser los del propulsor transversal de proa. Estos motores, suelen demandar mucha energía reactiva para magnetizarse y una parte de energía activa, para acelerar sus masas rodantes. El control de excitación

## Alternadores

observa las variaciones de tensión, generadas por las oscilaciones de la carga, para reaccionar en todas las máquinas del sistema, a fin de amortiguar en lo posible esa caída de tensión.

Disponer de alternadores sobredimensionados, permite a sus reguladores mantener la tensión del sistema, durante el arranque de los propulsores de Proa, reforzando las corrientes de excitación de los alternadores y volviéndolas al valor nominal, una vez que el motor de Proa ha arrancado.

**“Este sobredimensionado evita las caídas de planta, dando estabilidad al sistema de generación eléctrica.”**

Estando un alternador conectado a una red de potencia infinita, cediendo una determinada potencia activa, la variación de la corriente de excitación del alternador, no modifica significativamente el valor de esa potencia activa, sino que solamente lo hace en potencia reactiva.

Para cada valor de la corriente de excitación, y en consecuencia del vector E, el ángulo  $\delta$  de avance de esta f.e.m. respecto al vector U, será tanto mayor, cuanto mayor sea la potencia activa cedida a la red. Así, mayores corrientes estáticas, generan un aumento del par motor, convirtiéndose en un mayor avance de la posición de la rueda polar con relación al campo magnético giratorio,

El hecho de que el motor primario reduzca su potencia a cero, no impedirá que el generador síncrono se pare, ya que al seguir excitado y mantener la conexión a la red de tensión constante U, mantendrá su velocidad de sincronismo, pasando a trabajar como motor síncrono en vacío, o arrastrando al motor Diesel aún sin aporte de combustible.

3.1.10 Diagramas de potencias

Si representamos en ordenadas las potencias activas y en abscisas las reactivas, que cede o absorbe el alternador en función de la corriente de excitación y del par aplicado, observaremos el siguiente diagrama Fig. 38:

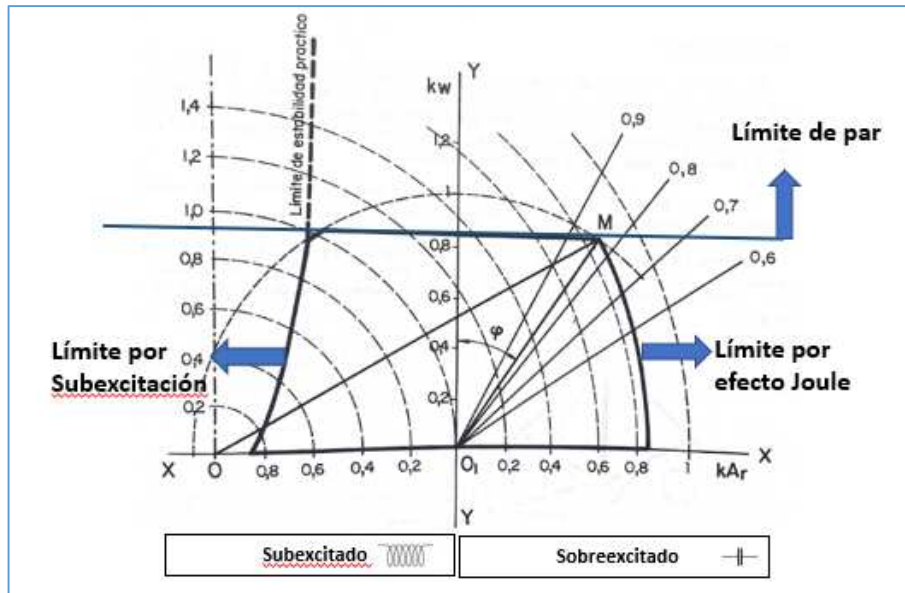


Fig. 38: Alternador Síncrono, límites de Operación. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Trazando desde  $O_1$  una recta de ángulo  $\varphi$  con el eje de ordenadas (potencias activas), la intersección con una circunferencia de radio 1 y centro  $O_1$ , determina el punto de funcionamiento de la máquina, punto M para un factor de potencia determinado. Sus coordenadas respecto al origen, nos darán en tanto por uno, las potencias activa y reactiva, que genera en ese punto el alternador, por fase. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

El segmento OM, representa proporcionalmente la relación  $E_0/U_m$  (tensión en vacío y de red), de un alternador no saturado, es decir de la relación en tanto por uno entre la corriente de excitación en el punto de funcionamiento M y en vacío, con la misma tensión en bornes U.

A efectos prácticos, los límites de operación estable de los alternadores síncronos, tal como se ve en la figura anterior, están limitados por los siguientes factores:

- En ordenadas, potencia activa, el límite superior lo marca la máxima potencia motriz de la máquina que arrastra al alternador y es la recta que se ve en la gráfica.
- En abscisas, potencia reactiva, los valores positivos forman parte de la generación propia del alternador y se conoce como zona de sobreexcitación, en la cual el alternador funciona con factor de potencia capacitivo. Los valores negativos significan que el alternador está absorbiendo del sistema potencia reactiva, como si fuera una inductancia.



## Alternadores

A esta zona se la conoce como de subexcitación, en la cual el alternador trabaja con factor de potencia inductivo.

- La limitación en los lados de la gráfica es debida a que no se puede mantener la misma potencia aparente con cargas que tengan factores de potencia bajos, debido al límite de temperatura isotérmico, por efecto Joule del bobinado del rotor. Su capacidad se reduce con cargas de factores de potencia bajos.

Esta reducción es mayor en el lado izquierdo debido a que en la zona de Subexcitación, una corriente de excitación muy baja, puede hacer que la rueda polar pierda el sincronismo, debido a la reducción del campo magnético y su par correspondiente. Si esta corriente llegara a anularse totalmente, el alternador seguiría entregando potencia activa, debido a la máquina que lo arrastra, pero absorbería potencia reactiva del sistema, para mantener la excitación-campo magnético, lo que produciría una reducción de la tensión en bornes, produciendo un sobrecalentamiento en el cobre del estator y un funcionamiento parecido al de un motor asíncrono.

### 3.1.11 Cortocircuitos de alternadores síncronos

Si se produce un cortocircuito en un alternador síncrono, estando este a plena tensión, los devanados del inducido, son recorridos en los primeros instantes por corrientes que alcanzan en los primeros periodos (<100 ms.) valores entre 3 y 6 veces su corriente nominal, para después de un tiempo, de uno a varios segundos reducirse al valor de cortocircuito permanente.

A la vez, la corriente de excitación debe incrementarse, intentando mantener la tensión en bornes y oscila fuertemente, hasta recuperar su valor inicial, al final del periodo transitorio.

En la Fig. 39, se observa que, según la tensión instantánea de la fase en cortocircuito, aparece una componente unidireccional ( $I_u$ ), suplementaria a la corriente de cada fase y una componente alterna amortiguada, que también se suma a la corriente de inducido, conociéndose estas como componentes subtransitorias, las cuales desaparecen muy rápidamente.

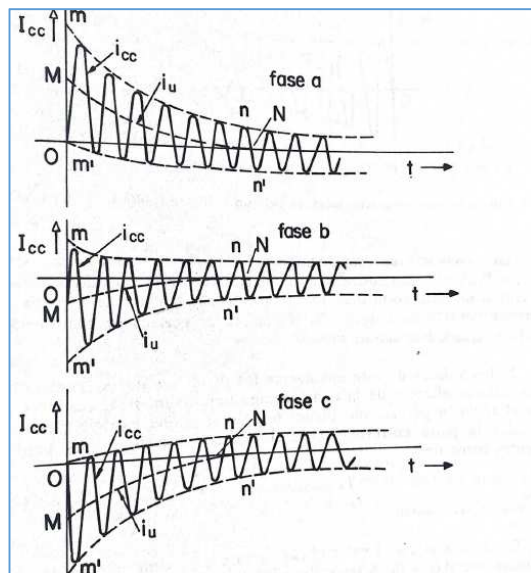


Fig. 39 Corrientes de corto circuito brusco de un alternador trifásico. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Se define como corriente subtransitoria, al valor eficaz de la componente alterna de corto circuito en el instante inicial, mientras que la corriente transitoria, es el valor eficaz que se obtiene extrapolando al periodo transitorio. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

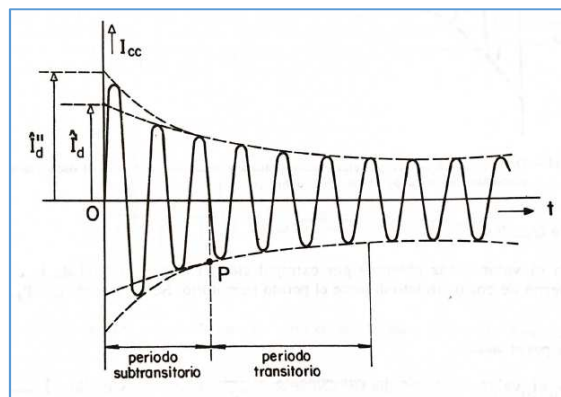
Corriente permanente es el mismo parámetro al final del periodo transitorio, es decir en servicio continuo.

## Alternadores

La corriente alterna simétrica de cortocircuito, se puede considerar como la superposición de tres corrientes alternas:

- Una de valor eficaz constante.
- Y dos exponenciales amortiguadas, denominadas componentes subtransitoria y transitoria, con constantes de tiempo respectivas del orden de milésimas de segundo la primera y de décimas de segundo la segunda.

En la práctica la subtransitoria desaparece al cabo de pocos periodos (<80 ms.) mientras que la transitoria lo hace hasta pasados unos segundos. Se observa en la Fig. 40:



**Fig. 40** Oscilograma de la corriente simétrica de c.c. brusco. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Interesa en esta tesis el estudio del cortocircuito brusco, porque nos permite determinar la corriente inicial máxima, corriente de choque, que sufrirán los devanados del inducido, lo que producirá altos esfuerzos mecánicos, que la máquina deberá soportar sin deformarse y que condiciona el dimensionamiento del alternador. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

El caso más desfavorable, es cuando el cortocircuito se produce coincidiendo con el paso por máximo de la tensión, ya que la componente unidireccional amortiguada alcanzará el valor máximo posible, si el cortocircuito es inductivo (resistencia óhmica del inducido despreciable).

Los arrollamientos amortiguadores, bobinas en cortocircuito alrededor de los polos, modifican el comportamiento transitorio y subtransitorio, frente a las corrientes de cortocircuito, mejorando el comportamiento del alternador.

### **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

El sobredimensionamiento del alternador, aporta además de las ventajas referidas, de mayor capacidad de cortocircuito, de mejor comportamiento frente al efecto de la saturación, etc. una energía cinética acumulada adicional, debido a su mayor inercia, que se transforma en potencia eléctrica instantánea, que ayuda al sistema en su estabilidad transitoria.

De no realizarse este sobredimensionado del alternador respecto del Diesel que lo arrastra, se recomienda instalar los sistemas (ACEE), acumuladores cinéticos de energía eléctrica, que este trabajo estudia, en plantas con riesgo de caída, al arrancar los propulsores transversales de proa.

## Alternadores

### 3.1.12 Balance de Potencias, Activa y Reactiva

La potencia eléctrica absorbida por el devanado primario (estator) se calcula así:

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi$$

**Ecuación ( 20 ) Potencia absorbida de la red. Motor de inducción.**

La potencia eléctrica consumida en forma de calor en el primario, efecto Joule, es:

$$P_{CU1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

**Ecuación ( 21 ) Pérdidas por calor en el cobre del primario.**

La diferencia entre  $P_1$  y  $P_{CU1}$ , es la potencia disponible para crear el campo magnético giratorio.

$$P_c = P_1 - P_{CU1}$$

**Ecuación ( 22 ) Potencia disponible para crear el campo magnético giratorio.**

Las pérdidas en el hierro del estator  $P_{Fe1}$ , se producen por la inducción de corrientes de Foucault y el fenómeno de la histéresis, reduciendo la potencia disponible en el entrehierro del campo giratorio.

Deduciendo de la potencia absorbida por el campo magnético giratorio  $P_c$ , la pérdida en el hierro  $P_{Fe1}$ , obtendremos la potencia electromagnética transmitida por inducción al secundario, o rotor  $P_a$ .

$$P_a = P_c - P_{Fe1} \quad R'_2 \cdot (1/s) - 1 = R'_c = 0$$

**Ecuación ( 23 ) Potencia electromagnética transmitida por inducción al secundario o rotor.**

Esta potencia, con el rotor en reposo y el devanado secundario cerrado sobre sí mismo, se disipa toda en forma de calor. Con el rotor girando, sólo se pierde una parte por efecto Joule, la correspondiente a la resistencia del devanado rotórico; el resto, se transforma en potencia mecánica interna del motor, potencia que es igual al par interno  $M_i$  por la velocidad angular  $\omega$ .

$$P_{mi} = M_i \cdot \omega$$

**Ecuación ( 24 ) Potencia mecánica interna.**

La potencia perdida por efecto Joule en el devanado del rotor, cuya resistencia por fase es  $R_2$  y por la que circula la corriente  $I_2$ , es:

$$P_{CU2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2$$

**Ecuación ( 25 ) Perdida de Potencia por efecto Joule en el rotor.**

Si deducimos las pérdidas  $P_{CU2}$ , de la potencia electromagnética transmitida por inducción al secundario, obtendremos la potencia que recogemos en el rotor de forma mecánica (potencia mecánica interna):

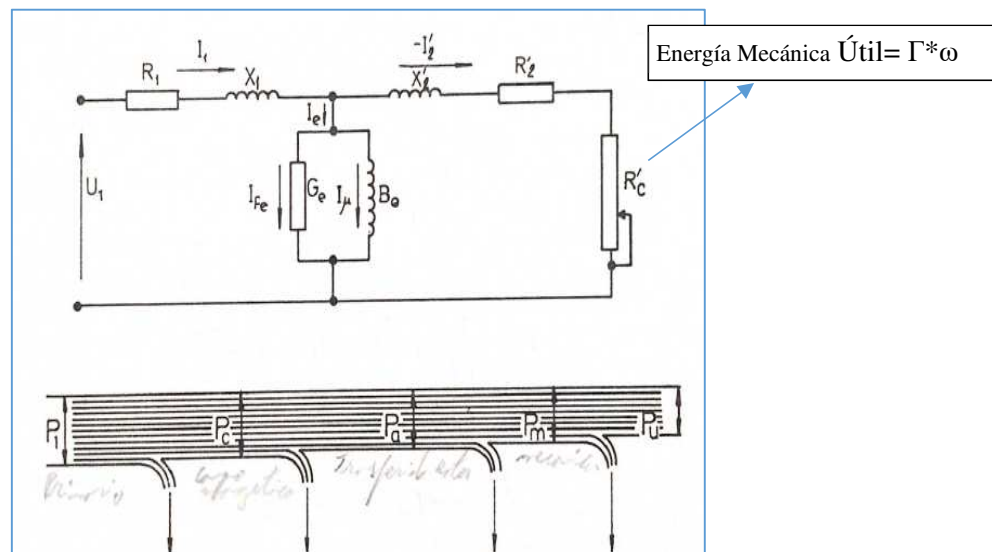


Fig. 41: Símil hidráulico del balance de energías. Motor de inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenvat-Badias).

Ecuación ( 26 ) Potencia Mecánica interna.

$$P_{mi} = P_a - P_{CU2}$$

En resumen, y haciendo un símil hidráulico del balance de energías del motor de inducción Fig. 41:

La potencia útil en el eje del motor es algo menor, debido a las pérdidas por rozamiento y resistencia del aire (incluida la ventilación) provocada por el giro del motor, lo que llamaremos pérdidas mecánicas.

Así la potencia útil quedaría así:

$$P_u = P_{mi} - P_m$$

Ecuación ( 27 ) Potencia útil. Motor de inducción.

A fin de determinar los elementos que componen las pérdidas:

$P_{CU1}$ , pérdidas en el cobre del estator.

$P_{Fe}$ , pérdidas en el hierro del estator.

$P_{CU2}$ , pérdidas en el cobre del rotor.

$P_{mi}$ , pérdidas mecánicas del conjunto.

Se realizan los ensayos de:

“Vacío”, donde determinamos las pérdidas en el  $F_e$  (Rama paralelo y curva tensión-intensidad, en el punto de  $I=0$ )

## Alternadores

“Cortocircuito”, o rotor bloqueado, donde determinamos las pérdidas en el  $C_U$ . (Rama serie y curva tensión-intensidad, en el punto de  $V=0$ )

Para determinar los parámetros de la rama paralelo, del circuito equivalente del motor de inducción ( $G_e$  y  $B_e$ ), realizamos el ensayo de vacío. Las variables a medir en este ensayo son:

Tensión de alimentación de la máquina  $V_n$  (debe coincidir con la tensión nominal)

Potencia en vacío  $P_0$ .

Corriente en vacío  $I_0$

Para ello se alimenta el motor a tensión y frecuencia nominal, haciéndole girar sin ninguna carga, a rotor libre. Como la velocidad de giro en vacío de una máquina asíncrona está muy próxima a la de sincronismo, esta se encuentra en una situación de deslizamiento casi cero, es decir sin apenas par mecánico, lo que se modela con un valor altísimo de la  $R'c$  (carga). Por tanto, toda la potencia consumida es debida a las pérdidas por rozamiento y ventilación.

Siendo la resistencia de carga del rotor  $R'c$  muy elevada en vacío, la corriente que circula por el rotor es muy pequeña y las pérdidas  $I^2 \cdot R'_2$  en el cobre del rotor resultan despreciables.

La potencia absorbida en este ensayo en vacío  $P_0$ , es igual a la suma de pérdidas en el cobre del estator  $P_{CU1}$ , las pérdidas en el hierro  $P_{Fe}$  y las pérdidas mecánicas  $P_{mi}$ .

$$P_0 = P_{CU} + P_{Fe} + P_{mi}$$

**Ecuación ( 28 ) Potencia absorbida en el ensayo de vacío de un motor de inducción.**

El valor de las pérdidas en el cobre  $P_{CU1}$  del estator, se obtiene multiplicando la corriente en vacío  $I_0$ , por el valor de la resistencia estática  $R_1$ , medida en el ensayo de corriente continua del motor de inducción asíncrono, ya que las bobinas del estator son accesibles.

Los valores de las pérdidas en el hierro  $P_{Fe}$  y mecánicas  $P_{mi}$ , se determinan alimentando el motor con varios niveles de tensión, desde su valor nominal hasta valores alrededor del 50% de la misma, con lo que tenemos un sistema de ecuaciones que permiten despejar las incógnitas.

Para cada valor de tensión de alimentación del motor, se mide la potencia absorbida por la máquina  $P_0$  y la corriente en vacío, con ello obtendremos el valor de las pérdidas en el hierro y mecánicas, según la fórmula:

$$P_{Fe} + P_{mi} = P_0 - 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2$$

**Ecuación ( 29 ) Pérdidas en el hierro y mecánicas de un motor de inducción.**

Gráficamente la suma de las pérdidas en el hierro y las mecánicas en función de la tensión de alimentación, es una parábola Fig. 42:

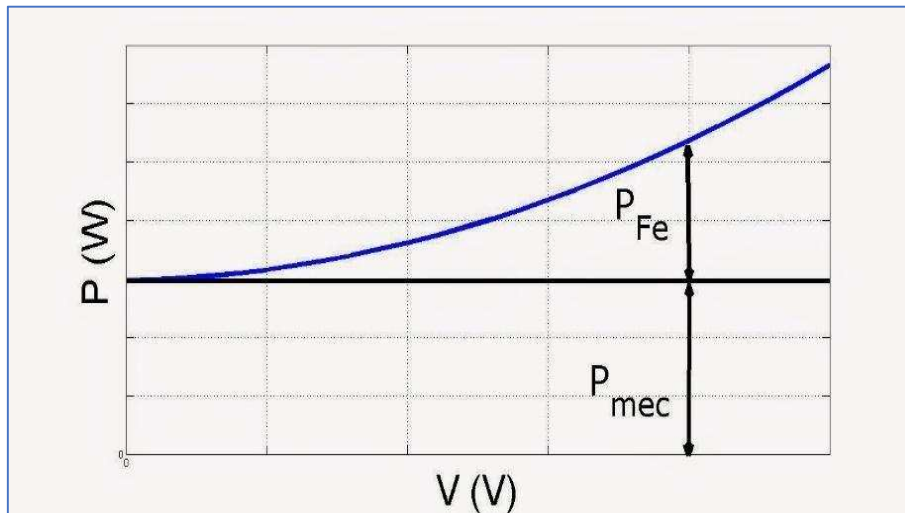


Fig. 42: Pérdidas en el hierro y mecánicas, ensayo en vacío de un Motor de Inducción. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

Si extrapolamos la curva hasta su intersección con el eje de ordenadas, encontramos el valor de las pérdidas mecánicas  $P_{mi}$  aislado, ya que en ese punto la tensión de alimentación de la máquina  $V_0$  es cero y por tanto las pérdidas en el hierro  $P_{Fe}$  son despreciables.

Para reducir errores en la extrapolación, lo representaremos en función del cuadrado de la tensión, convirtiéndose entonces en una recta cuya ordenada en el origen representa el valor de las pérdidas mecánicas  $P_{mi}$  del motor, Fig. 43:

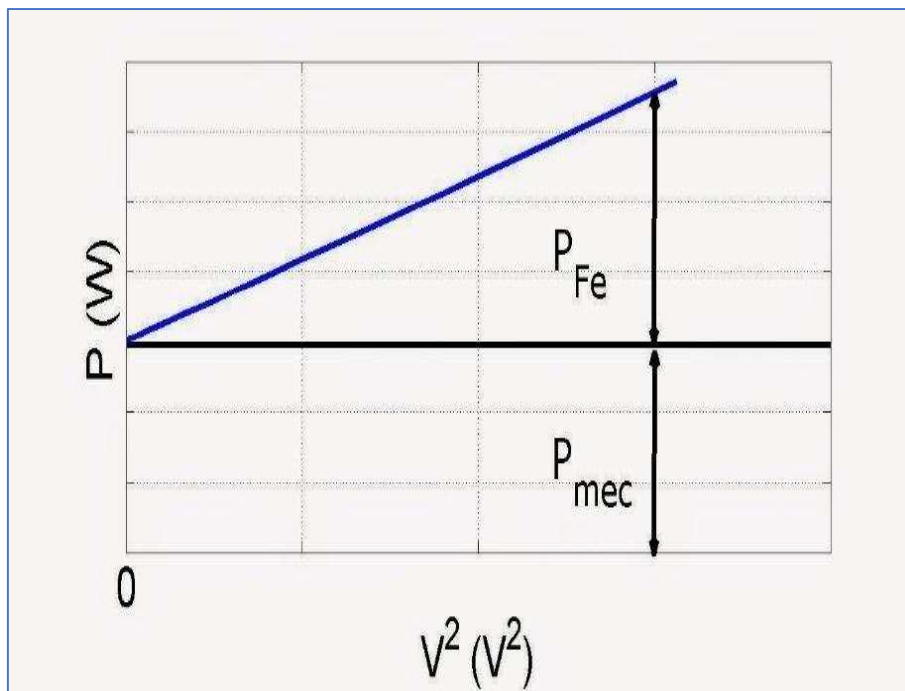


Fig. 43: Pérdidas en el hierro y mecánicas en función del cuadrado de la tensión de alimentación. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)



## Alternadores

Perdidas en el hierro y mecánicas en función del cuadrado de la tensión de alimentación.

A partir de las pérdidas mecánicas conocidas, podemos encontrar el valor de las pérdidas en el hierro a tensión nominal y en consecuencia podremos determinar los valores de los componentes de la rama paralelo del circuito equivalente, según las fórmulas siguientes:

$$\cos\phi_0 = P_{Fe}/3 * V_n * I_0, \quad I_{Fe} = I_0 * \cos\phi_0$$

$$I_{\mu} = I_0 * \sin\phi_0$$

$$\text{Donde:} \quad G_e = V_n / I_{Fe} B_e = V_n / I_{\mu}$$

**Ecuación (30) Ecuaciones de la rama paralelo del circuito equivalente del motor de inducción.**

Para determinar los parámetros de la rama serie, del circuito equivalente, resistencia y reactancia del rotor de jaula de ardilla,  $R'_2$  y  $X'_2$ , se realiza el ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado. Es un ensayo similar al que se realiza con los transformadores.

Estando el rotor bloqueado, se aplica al estator de forma gradual, una tensión trifásica reducida  $U_{cc}$ , hasta que le provoque la circulación de una corriente igual a la nominal del motor  $I_1$ , (corriente de placa).

Las variables a medir son:

- Tensión del ensayo de cortocircuito  $V_{cc}$
- Corriente inyectada durante el ensayo de cortocircuito  $I_{cc}$
- Potencia absorbida  $P_{cc}$

A diferencia del ensayo de vacío, al estar alimentado el estator de la máquina a tensión reducida se considera que la corriente en vacío  $I_0$  es despreciable frente a la corriente de cortocircuito  $I_{cc} = I_n$ , por lo que podemos despreciar los componentes de la rama paralelo del circuito equivalente.

La resistencia e inductancia de cortocircuito,  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ , se pueden obtener según las siguientes formulas, basándose en las medidas realizadas en el ensayo de cortocircuito:

$$\cos\phi_{cc} = P_{cc}/3 * V_{cc} * I_{cc}$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = V_{cc} * \cos\phi_{cc} / I_{cc}$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = V_{cc} * \sin\phi_{cc} / I_{cc}$$

como  $R_1$  se conoce por el ensayo de corriente continua, entonces:

$$R'_2 = (V_{cc} * \cos\phi_{cc} / I_{cc}) - R_1$$

**Ecuación ( 31 ) Ecuaciones de la rama serie del circuito equivalente Thévenin motor de inducción.**

En ausencia de información de como separar el valor correspondiente de  $X_{cc}$  entre los valores de  $X_1$  y  $X'_2$ , asumiremos que:

$$X_1 = X'_2 = X_{cc}/2$$

**Ecuación ( 32 )  $X_1, X'_2$  de la rama serie del circuito equivalente Thévenin motor de inducción.**



## 5 PROBLEMÁTICA EN LAS PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Se analizarán en este capítulo, los orígenes de la desestabilidad en las plantas eléctricas, causadas exclusivamente por fenómenos externos a ellas.

### 5.1 CARGAS DINÁMICAS

Los motores eléctricos de inducción, requieren de potencia activa extra para acelerar sus masas e inercias del mecanismo asociado, hasta la velocidad de régimen. Esta energía cinética acumulada, puede convertirse reversiblemente en corriente eléctrica de forma transitoria, como ocurre en los acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE).

Los motores eléctricos de inducción demandan, además energía reactiva para su magnetización. En el instante inicial del arranque, que suele durar entre 100 y 1000 ms, dependiendo de su potencia e inductancias. También se acumula la energía de magnetización, de forma reversible.

Esas potencias instantáneas necesarias para magnetizar y acelerar las masas hasta la velocidad de régimen, requieren de la circulación de una corriente muy superior a la nominal, entre 7 y 8 veces, lo que a menudo genera fuertes caídas de tensión transitorias.

La falta de esta potencia instantánea, es la que hace caer las plantas en la mayoría de los casos, pues la tensión baja significativamente, por debajo de los valores de consigna, afectando a los controladores, que no pueden llegar a compensarla. Este fenómeno sólo es visible con registros oscilográficos o similares, que no son aún usuales a bordo.

Los componentes de la potencia son: Fesor Potencia Activa P, Fesor Reactiva Q y Fesor Potencia Aparente S como composición de los dos, con el  $\cos \phi$  como ángulo de desfase entre ellos.

La magnitud del desfase entre potencia activa y reactiva, se produce dependiendo de los tipos de carga que existan, (resistiva, inductiva o capacitiva) y de los que se vayan incorporando y desconectando.

Dado que, en el arranque un motor de inducción demanda entre 7 y 8 veces su corriente nominal, con factores de potencia del orden de 0,4, es importante analizar el comportamiento dinámico del Alternador, frente a una sobrecarga, ya sea debida a un arranque de motor o a una variación brusca de la carga.

Para este análisis. nos valemos de las siguientes curvas características experimentales: (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

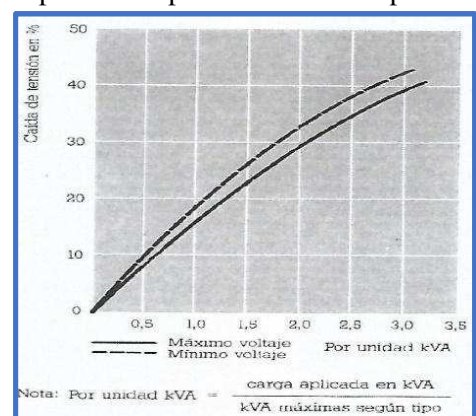


Fig. 44: Curva de Caída de Tensión de un alternador síncrono, en función de la corriente de carga que circula por él. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Curva de caída de Tensión del alternador, en % y carga resistiva Fig. 44.

Este ensayo, es útil para conocer como caerá la tensión de salida, en función de la carga que se aplique; suele moverse entre el 20% para la carga nominal, hasta > 40% en caso de estar cercanos a la corriente de máxima sobrecarga admisible. Cae bruscamente a cero en caso de cortocircuito, aproximadamente tres veces la corriente nominal, en los mejores alternadores síncronos comerciales.

### Curva Tensión-Corriente.

Informa de las zonas de trabajo del alternador, desde los transitorios provocados por la carga, hasta la corriente de cortocircuito y en función del tipo de carga, ya sea inductiva o capacitiva.

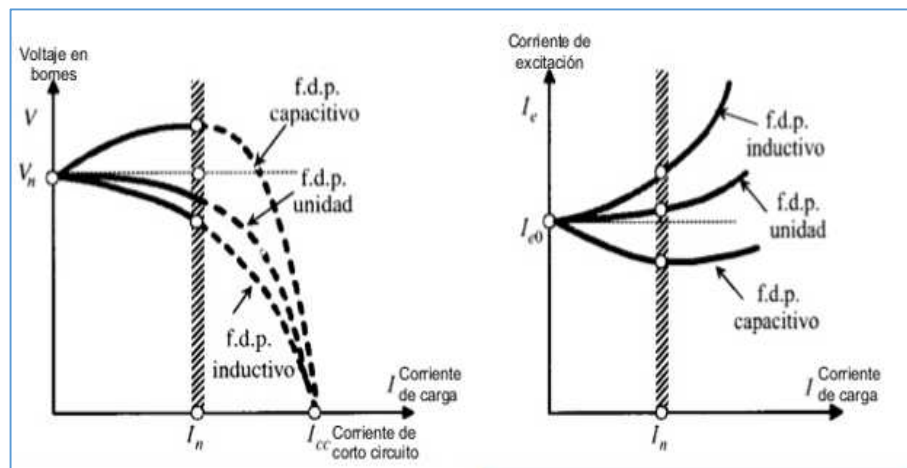
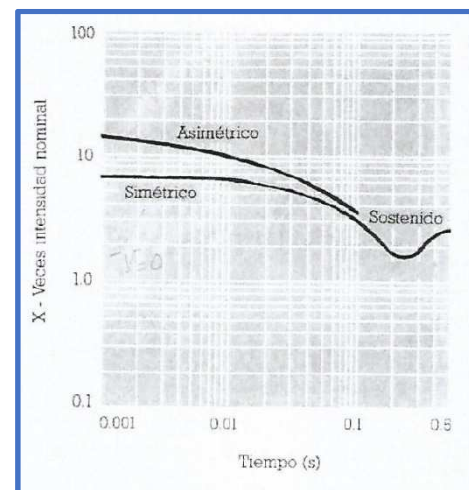


Fig. 45: Curva Tensión en Bornes-Corriente de carga y Curva Corriente de excitación-Corriente de carga, en maquina sincrona. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

La situación de cortocircuito simétrico y/o asimétrico de un alternador síncrono, puede soportarse durante un tiempo máximo de 10 s. aproximadamente. Los valores de la corriente ascienden por encima de las 10 veces la corriente nominal, durante fracciones de segundo, en caso de cortocircuito asimétrico. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

Como se observa en la Fig. 46, la actuación del control electrónico (AVR) de la corriente de excitación del alternador síncrono, tiene un comportamiento singularmente mediocre, alrededor de aproximadamente los 100 ms, momento en el cual vuelve a crecer la corriente, estabilizándose en el entorno de los 500 ms.

Fig. 46: Intensidad de excitación-tiempo, maquina sincrona en cortocircuito. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).



## Problemática en las plantas de generación eléctrica

La corriente de cortocircuito lleva asociada grandes caídas de tensión, debido a que las reactancias internas del alternador, consumen toda la  $E$  disponible, dejando la tensión en bornes a cero. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

Esta corriente de cortocircuito, genera un gran riesgo de parada completa de planta, por el par resistente que transmite al Diesel que puede llegar a calarse. Esta parada intempestiva del Diesel se conoce con el nombre de “*Blackout*”.

La corriente de arranque disminuye a valores inferiores cercanos al nominal, cuando el motor eléctrico de inducción alcanza su velocidad de régimen  $\omega_s$ . La tensión del alternador tarda unos 400 ms, en recuperarse y se produce finalmente un rebasamiento en su valor, según el tipo de regulador de tensión instalado.

## 5.2 CAÍDAS DE FRECUENCIA

Si la frecuencia cae el 50%, es la velocidad de sincronismo la que varía. Las caídas de frecuencia en generadores síncronos suelen ser debidas a que el par resistente del alternador no puede ser asumido por el Diesel que lo arrastra, disminuyendo su velocidad y por tanto su potencia hasta que el Diesel es capaz de asumir el par resistente del alternador.

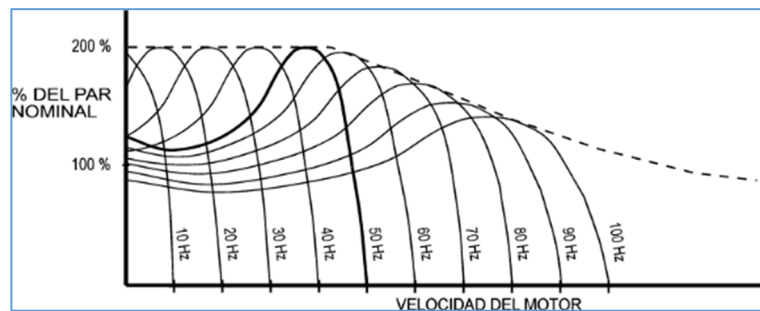


Fig. 47: Curva Par - Velocidad a diferentes frecuencias. Fuente: Tecnicuport.com

El resto de motores de la instalación también disminuyen su velocidad de sincronismo asociada a la frecuencia, aportando su energía cinética en forma de electricidad, trabajando como generadores de forma transitoria.

### 5.3 HUECOS DE TENSION

Este acontecimiento de caída temporal de la tensión, suele producirse tanto por causas externas, como de la propia planta de generación, que puede quedar afectada por los errores humanos de operación.

Se analiza a continuación su definición precisa y sus características.

#### 5.3.1 Profundidad, duración y recuperación. Generación de reactiva Q

La norma UNE-EN 50160 (7) define el hueco de tensión, como una reducción brusca de la tensión de alimentación de una red eléctrica, a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión nominal, seguida del restablecimiento de la tensión, después de un corto período de tiempo.

Por convenio, un hueco de tensión tiene una duración de entre 10 ms y 1.000 ms. Los huecos de tensión se pueden dar en una, dos o las tres fases.

Las variaciones de tensión que no produzcan caídas iguales o superiores al 90%, no se consideran huecos de tensión.

Los huecos de tensión se caracterizan por la “Profundidad”, que se define como el valor de la tensión residual en fracciones de la unidad y la duración de la misma “Duración”, que se define como el número de ciclos que dura.

Los huecos de tensión, pueden ser producidos por faltas originadas en la red, que mientras se despejan dejan sin tensión al resto de la instalación. También por sobrecarga de la misma, ya sea por arranque de grandes motores eléctricos, por variaciones bruscas de la carga, por conexión de grandes transformadores, o por sobrecarga general.

Los huecos de tensión producen, en una carga tipo motor de inducción trifásico que este girando a régimen, los siguientes efectos:

- Sobre intensidad en algunos casos, para compensar la disminución de par disponible.
- Disminución de par.
- Pérdida de velocidad mecánica.

En las maquinas síncronas, ocurre el mismo efecto y se añade la posible pérdida de sincronismo.

Es precisamente en los casos de arranque de grandes motores de inducción, que necesitan acelerar sus masas y solicitan fuertes corrientes con bajos factores de potencia, donde se generan fuertes caídas de tensión internas, que hay que compensar con regulación de la corriente de excitación del alternador.

Los huecos de tensión, se denominan simétricos o asimétricos, dependiendo de si afecta por igual a la tensión eficaz de las tres fases. El arranque de grandes motores trifásicos de inducción, produce generalmente huecos de tensión simétricos.

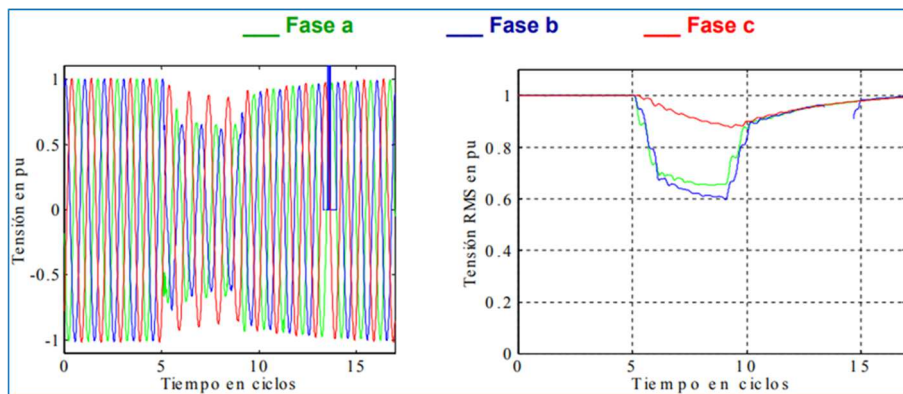


Fig. 48: Huevo de tensión asimétrico en red de 6 kV. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

El sistema de Acumulador Cinético de Energía Eléctrica (ACEE) que aquí se propone, da también respuesta a este problema, ya que puede llenar los huecos en tensión, que se puedan producir transitoriamente. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

Si el hueco de tensión dura más de un minuto, suele denominarse “Micro Corte de Tensión”



#### 5.4 CAÍDAS DE PLANTA. “POWER BLACKOUT”

La caída de planta eléctrica “Power Blackout”, o “Blackout”, es una situación muy peligrosa y arriesgada para un buque, especialmente por lo que afecta al gobierno y a la maniobra en buques tradicionales, pero aún más en buques especializados, donde la energía es esencial para el mantenimiento, en condiciones de seguridad de la tripulación, del buque y de la propia carga. (Prousalidis *et al.*, 2008; Qi, Sun and Mei, 2015; Pi *et al.*, 2018)

Generalmente la energía a bordo es corriente alterna trifásica, que está suministrada por grupos electrógenos (GE), normalmente compuestos de una máquina térmica Diesel, que arrastra a un alternador síncrono. Sus correspondientes controles son:

- Frecuencia-potencia activa f-P, control de flujo de combustible del motor Diesel.
- Tensión-Reactiva U-Q, control de corriente de excitación de cada alternador. (Bosch-Tous, Casals-Torrens and Serrano-Fontova, 2018; Bosch-Tous, R, Casals-Torrens, P, Alvarez-Florez, J, Serrano-Fontova, 2018)

Esta energía, depende de los grupos electrógenos (GE), tanto en calidad, como en estabilidad.

La proliferación de equipos eléctricos y electrónicos de potencia conmutada en un buque, hace que la gestión de la energía sea hoy más crítica, pues los controladores de velocidad de las cargas, pueden entrar en conflicto con los reguladores de f-P y U-Q de la generación.

Los grupos electrógenos, trabajan normalmente en conjuntos conectados en paralelo y dimensionados para la carga máxima, teniendo en cuenta los dos factores, el del % de consumo y el de simultaneidad de cada servicio a bordo. Es aconsejable disponer de potencias de respaldo, que permitan compensar la indisponibilidad, de algún grupo de generación por avería o por cualquier otro tipo de fallo.

Tradicionalmente el alternador se dimensiona de igual potencia en kVA, que el motor térmico que lo arrastra en kW, asumiendo cargas puramente resistivas. El alternador debe estar dimensionado para el escenario de máximas corrientes, de posibles arranques simultáneos de máquinas eléctricas, especialmente las de inducción, con un importante consumo de energía reactiva.

Las tensiones trifásicas más utilizadas son: 400 V-50 Hz, 440 V-60 Hz, en buques de nueva construcción. Si existe un gran consumo eléctrico, incluyendo los de propulsión eléctrica o híbrida, se alcanzan tensiones de 6,3 kV. En Ferry cuyo consumo es aún mayor, se llega a los 11 kV.

Las situaciones de trabajo de una planta eléctrica, pueden ser las siguientes:

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

- Vacío: situación del alternador en funcionamiento, manteniendo su tensión nominal, sin carga externa. Deben vigilarse las sobretensiones, pues suelen aparecer en vacío al perder la carga.
- Nominal: el alternador tiene una carga externa correspondiente al 100% para lo que fue diseñado. Todos los controles de f-P y V-Q deben estar activos y funcionando para mantener la tensión y frecuencia.
- Sobrecarga: el alternador trabajando en régimen transitorio, con una corriente suministrada superior a la nominal e inferior a la de cortocircuito. Con mal tiempo y propulsión eléctrica, es admisible la sobrecarga de la instalación, siempre que venga seguida de un tiempo de relajación de la carga, que permita no superar las temperaturas máximas de operación de los diferentes componentes del sistema.
- Cortocircuito: el alternador se encuentra sometido a la máxima demanda de corriente, cercano al 300% de su nominal (impedancia del 33% en los mejores alternadores del mercado). La tensión en bornes cae a cero.

La planta de generación eléctrica de potencia, debe ser capaz de trabajar desde una posición en vacío, hasta plena carga y no considerar circunstancias especiales los episodios transitorios, que se aproximen a la corriente de cortocircuito, durante los arranques de grandes motores, que deben soportarse sin riesgos de inestabilidad.

Los arranques de los motores de inducción, demandan una gran cantidad de energía activa y reactiva, con corrientes de arranque que oscilan entre las 7 y 8 veces su corriente nominal, mientras que el alternador comercial en una situación límite de cortocircuito, solo puede dar hasta 3 veces su corriente nominal, cayendo a cero su tensión en bornes, cosa que afecta al resto de cargas a bordo.

Las limitaciones en la corriente de cortocircuito, nos enfrentan al dilema de cómo dimensionar un grupo electrógeno GE de forma óptima, especialmente si se deben alimentar grandes motores de inducción.

El regulador de Frecuencia-Potencia (f-P), es el responsable de asegurar la estabilidad en frecuencia y potencia activa, controlando el paso de combustible del Motor Térmico y con ello la velocidad de rotación del alternador.

El regulador de Tensión-Reactiva (U-Q), es el responsable de asegurar la estabilidad en tensión y energía reactiva, mediante el control de la corriente de excitación del alternador, para compensar las caídas de tensión internas del alternador, en sus reactancias, que son del orden del 33 %.

Gestionar correctamente en el tiempo la energía reactiva, es uno de los factores más importantes para asegurar la estabilidad de las plantas de generación eléctrica, siendo en la mayoría de los casos, su falta de disponibilidad o de control, la causante de los “*Blackouts*”. Este problema no se soluciona

## Problemática en las plantas de generación eléctrica

incrementando la potencia del Motor Diesel, sino la del alternador, combinado con una buena regulación de Tensión- Reactiva U-Q.

Estos controles, deben actuar con precisión en el tiempo, para que el grupo de generación adapte sus parámetros internos a mantener la tensión en bornes constante, que es lo que demanda la carga, asegurando en todo momento la estabilidad del conjunto.

Una buena regulación de U-Q, mediante un adecuado sistema AVR "*Automatic Voltage Regulation*" y un correcto dimensionado de los alternadores, puede ser una solución a las caídas incontroladas de plantas de generación eléctricas, que tanto daño producen en el transporte marítimo.

La potencia de cortocircuito de los generadores, debe dimensionarse por encima de la suma de las corrientes de arranque simultaneas, solicitadas por los motores más grandes de la instalación eléctrica, de este modo no se producirán caídas de tensión, del todo inadmisibles.

Las protecciones eléctricas, deben estar ajustadas de forma coherente con estos criterios, de permitir el paso de las corrientes de arranque "normal" de motores eléctricos.

La calidad del suministro debe satisfacer las siguientes cualidades, que son fijadas por las Sociedades de Clasificación y la Administración Marítima:

- Continuidad del suministro, las caídas de plantas son inadmisibles en Plantas de Generación Eléctricas Marinas.
- Las variaciones de la tensión de suministro y de la frecuencia, así como de los armónicos, deben estar dentro de los márgenes establecidos por las Sociedades de Clasificación que figuran en la tabla siguiente.
- Calidad de la onda, que debe ser lo más senoidal posible.

**Tabla 5 Límites de Variación de Tensión-Frecuencia y Armónicos según las SSCC.**

SSCC Sociedad Clasificación	Variación del Voltaje Permanente	Variación del Voltaje Transitorio	Variación de la Frecuencia Permanente	Variación de la Frecuencia Transitoria	THD (Total Distorsión de Armónicos) sobre el Voltaje nominal
ABS	-10%	±20% (1,5s.)	±5%	±10% (5s.)	No debe exceder del 8% y ninguno individualmente del 5%.
BV	+6%, -10%	±20% (1,5s.)	±5%	±10% (5s.)	No debe exceder del 5% y ninguno individualmente del 3%.
DNV-GL	±2,5%	-15% hasta +20%	±5%	±10%	Debe satisfacer la norma IEC 61000-2-4 Class 2. Adicionalmente ninguno debe exceder del 5%.
Lloyd's R. S	±2,5%	-15% hasta +20% (1,5 s.)	±5%	±10% (5s.) +6%,	No debe exceder del 8% de la fundamental para todas las frecuencias, hasta 50 veces la de suministro.

Para una buena estabilidad de las plantas de generación eléctrica a bordo, se requiere de un sobredimensionamiento del alternador, lo que supone para el armador un sobre coste pero que, en su defecto, le limita la flexibilidad de las operaciones de servicio simultáneo, con el riesgo de caídas de planta incontroladas, que pueden provocar graves accidentes.

A pesar de que estos accidentes, suelen tener costes muy superiores al del sobredimensionado del alternador, es de resaltar que sigue siendo la práctica habitual, dimensionar en relación de potencias, 1 kW de motor Diesel /1 kVA de Alternador.

En esta Tesis se propone especialmente la actuación en plantas ya construidas, añadiendo sistemas de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE) en base a “*Flywheels*” (Volantes de inercia), con los controles y software correspondientes.

Se hace imprescindible el uso generalizado de osciloscopios y analizadores de redes eléctricas para que el personal embarcado, sea consciente del riesgo potencial de sus instalaciones y pueda analizar las causas de posibles anomalías y sus posibles soluciones. También es importante la formación técnica del personal responsable.

Uno de los eventos de consumo más críticos a bordo, suele ser el arranque de los motores de inducción de las hélices transversales de proa. Todos los buques deberían medir las tensiones y corrientes durante los primeros instantes del transitorio de arranque, para saber el margen de estabilidad de sus plantas. Se recomienda realizar esta medida con el buque amarrado, registrando

## **Problemática en las plantas de generación eléctrica**

los valores de tensión y corriente de los primeros 10 segundos, hasta que el propulsor llega a su velocidad de régimen.

En propulsión Diesel-Eléctrica, la proporción entre potencia del Diesel (kW) y potencia del alternador (kVA), debe estar entre 1 kW / 2 kVA y 1 kW / 3 kVA según sean los métodos de arranque de los propulsores y los contenidos de armónicos de las corrientes de sus controladores de velocidad y par.

En casos de arranques severos de los propulsores de embarcaciones con posicionamiento dinámico (DP) o estabilización dinámica, con convertidores de frecuencia electrónicos de potencias elevadas, esta proporción puede llegar a los 1 kW / 5 kVA.

## 6 POSIBLES SOLUCIONES DE ESTABILIDAD

### 6.1 TECNOLOGÍAS PARA AUMENTAR LA POTENCIA TRANSITORIA, EXPERIENCIAS EMPÍRICAS

Se analizan aquí, distintas tecnologías, que nos permiten aumentar la potencia transitoria generada a bordo. Por lo general, se realiza mediante alternadores síncronos de mercado con impedancias del 33%, lo que supone una corriente máxima suministrable por el alternador o corriente de cortocircuito  $I_{cc} \approx 3 \times I_N$ . Esta corriente transitoria generalmente es insuficiente para el arranque de grandes motores eléctricos de inducción y debería aumentarse, para que se acerque a la disponible en sistemas terrestres alimentados por transformadores. Estos tienen reactancias internas del 5%, lo que comporta una corriente máxima suministrable o de cortocircuito del transformador:  $I_{cc} \approx 20 \times I_N$ , que permite alimentar correctamente la mayoría de transitorios electromagnéticos, que provocan las cargas dinámicas alimentadas, en tiempos de fracciones de segundo.

Los análisis tecnológicos, requieren metodologías experimentales con dispositivos físicos donde ensayar. En nuestro caso, se han usado materiales básicamente comerciales, puestos a punto en proyectos anteriores, que acumulan la experiencia del equipo de trabajo, alrededor de la propulsión naval eléctrica híbrida serie.

Albert Peregrina Velasco, (Peregrina Velasco and Grau Mur, 2007) es el primer estudiante que, en su Proyecto fin de carrera de la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC), propone la cadena de propulsión eléctrica híbrida, sobre la que se trabaja, montada en un casco de embarcación PR600, de motonáutica de competición de 4,5 m de eslora, denominada RAS. (Bolao i Cano and Bosch-Tous, 2018)

Actualmente esta cadena energética, ligeramente modificada, se está montando en otra embarcación “LADY” (*Laboratori d’Assaig Delta Triangle*), con otros criterios de ensayo y experimentación. Es una motora “SEARAY” de 6,5 m de eslora, a la que se le ha retirado el motor convencional de gasolina de 150 kW, su cadena propulsora y el depósito de 300 l de gasolina, para experimentar sobre nuevas cadenas propulsoras de tipo híbrido-serie.



Fig. 49: Embarcaciones “RAS” (PR 600) izquierda y “LADY” (SEARAY 6,5 m eslora) derecha.  
Fuente: Bolao i Cano, B. and Bosch-Tous, R. (2018) Aportacions a la Motorització elèctrica híbrida de l'embarcació LADY/ UPC Commons.

## Posibles soluciones de estabilidad

En el laboratorio de ingeniería eléctrica (DEE), de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), se ha trabajado con una cadena energética equivalente a la que se pretende montar en la embarcación LADY, relacionada a continuación. Su puesta en servicio queda fuera del alcance de esta Tesis:

- Grupo electrógeno comercial HONDA gasolina 6,4 kW / 6,5 kVA,  $\cos\phi=1$ , considerado el grupo comercial trifásico, 400 V / 50 Hz, de referencia.
- Motor de inducción de 4 kW / 400V en vacío, que tiene un transitorio electromecánico de arranque muy similar al arranque simultáneo de los 2 propulsores de la embarcación anterior, RAS, de 2,2 kW, 400 V / 50 Hz,  $I_N=5,5$  A,  $I_S=23$  A, IP68, que se montarán en la embarcación LADY, después de haberse ensayado en la embarcación RAS. (Bolao i Cano and Bosch-Tous, 2018)



**Fig. 50: Motor Tesla sumergible con hélice, embarcación “RAS” (PR600). Fuente: Bolao i Cano, B. and Bosch-Tous, R. (2018) Aportacions a la Motorització elèctrica híbrida de l'embarcació LADY/ UPC Commons.**

Este arranque simultáneo de los dos propulsores de inducción de 2,2 kW, demanda unos 50 A, durante dos décimas de segundo y desestabiliza fuertemente al generador Honda 6,4 kW / 6,5 kVA,  $\cos\phi=1$ , en frecuencia y tensión, porque no puede suministrar más de 30 A de forma transitoria. El motor térmico de gasolina, se cala en dos de cada diez arranques simultáneos de los propulsores.

Se ha reproducido esta casuística en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de Ingeniería eléctrica (DEE), con el motor Novat ya referenciado de 4 kW, 400 V, 50 Hz, arrancando en directo y en vacío, es decir sin par resistente asociado, y otros motores de potencia nominal similar y de marcas diferentes. Es una cadena energética muy adecuada, para el análisis experimental de los transitorios electromagnéticos, que se pretende realizar.

Para evitar este problema de falta no evidente de potencia transitoria, en el grupo electrógeno de referencia comercial Honda 6,4 kW / 6,5 kVA,  $\cos\phi=1$ , se construyó un grupo electrógeno especial

a medida, para demostrar que no es un problema de potencia activa media, sino de potencia instantánea transitoria. Se instaló un motor térmico de menor potencia y un alternador de mayor potencia, según los tamaños normalizados de catálogo comercial, resultando un conjunto capaz de alimentar cargas inductivas, Es decir, un motor térmico de 4,6 kW y un alternador de 8,5 kVA, que permite alimentar en permanencia cargas con  $\cos\phi=0,5$ , denominado también RAS, por haberse montado en la embarcación PR 600 (RAS), en proyectos anteriores.

Los ensayos han demostrado que este grupo electrógeno a medida, RAS, permite el arranque directo simultaneo de los dos propulsores de 2,2 kW, con mayor fiabilidad. En el laboratorio, el arranque del motor de 4 kW en vacío, resulta equivalente en su corriente de arranque. Los transitorios electromecánicos que se generan, son perfectamente asumibles para este grupo electrógeno a medida con  $\cos\phi=0,5$ . Aunque provoca un hueco de tensión, durante el arranque del motor de 4 kW, el motor térmico no se ha calado en ningún ensayo.

La Tesis que se presenta, analiza experimentalmente las tecnologías que permiten hacer frente a estos transitorios de arranque: Grupo electrógeno (RAS) gasolina con un alternador sobredimensionado respecto al motor térmico que lo arrastra, demuestra que es más estable frente al transitorio de arranque en vacío del motor de inducción de 4 kW, a pesar de que el motor térmico es menos potente, que el grupo electrógeno Honda comercial de referencia de gasolina, 6,4 kW / 6,5 kVA,  $\cos\phi=1$ .

Además de lo analizado en este apartado relativo a las tecnologías existentes para aumentar la potencia transitoria, se analizarán las siguientes actuaciones posibles:

- Sobredimensionamiento de los alternadores.
- Grupos de condensadores.
- Acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE) con volante de inercia, como el desarrollado en esta Tesis.



### 6.1.1 Sobredimensionamiento del Alternador. Potencia activa P y reactiva Q

Toda instalación eléctrica debe soportar cortocircuitos de un segundo, que es lo que tardan las protecciones en despejarlo, en el peor de los escenarios.

Recordemos que la corriente máxima o de cortocircuito que puede suministrar un alternador síncrono comercial, cuya impedancia está en el entorno del 33% es como mucho 3 veces su corriente nominal, aunque esté perfectamente controlado.

El par resistente que el alternador ofrece al motor Diesel que lo arrastra, durante el tiempo que alimenta esa corriente de cortocircuito, es de 3 veces el par nominal y suele ser aportado por el volante de inercia del motor Diesel y por el propio rotor del alternador, pues el Diesel no puede superar significativamente su par motor nominal.

Los alternadores utilizados en las plantas navales, se suelen dimensionar tradicionalmente solo con el criterio de eficiencia, de tal forma que su potencia nominal, sea similar a la del Diesel. Un 20% de sobredimensionado del alternador permite hacer frente a ciertas cargas inductivas con  $\cos \phi=0,8$ . Esto supone una limitación a la respuesta transitoria, durante el arranque de grandes motores de inducción, pues estos solicitan en el arranque una corriente de unas siete veces la nominal del motor, a  $\cos \phi=0,4$ , durante algunos segundos, que pueden superar la máxima que puede suministrar el alternador o corriente de cortocircuito, llevando la tensión en bornes a cero.

### 6.1.1.1 Arranque de grandes motores de inducción

Un alternador no puede arrancar correctamente un motor de inducción de su misma potencia, aunque las corrientes nominales de ambas máquinas parezcan ser compatibles. El arranque del motor requiere de una corriente dos o tres veces mayor, de la que puede suministrar el alternador de la misma potencia, haciendo caer su tensión, en una proporción similar y alargando el tiempo de arranque en el mejor de los casos, cosa que afecta negativamente al resto de cargas alimentadas por ese alternador.

El alternador interpreta los arranques como episodios de sobrecarga o cortocircuito, que pueden desestabilizar la planta, por actuación temprana de sus protecciones, caída exagerada de las tensiones o incluso calado del motor Diesel.

Si el arranque del motor eléctrico, con corrientes del alternador cercanas a las máximas o de cortocircuito, dura más de lo previsto, en general 1 s, consume la energía cinética acumulada en el volante de inercia del motor Diesel y puede llegar a calar el motor térmico que arrastra el alternador, pues no puede realizar correctamente la siguiente carrera de compresión del cilindro correspondiente.

Esto se evita sobredimensionando el alternador, para aumentar su corriente máxima y que sea capaz de suministrar esa corriente de arranque al motor eléctrico a  $\cos \phi=0,4$ , sin grandes caídas de tensión. Así el arranque del motor dura menos tiempo.

En algunas aplicaciones no es necesaria una respuesta mecánica vigorosa del motor eléctrico y puede admitirse una aceleración suave y alargada en el tiempo, que va asociada a una menor corriente de arranque del motor.

En muchos barcos el motor transversal de proa, se arranca por el sistema ( $\Delta$ ), para amortiguar su corriente de arranque, alargando en el tiempo su aceleración. En el momento de la conmutación ( $\Delta$ ), en algunas ocasiones, se presentan breves puntas de intensidad similares a las del arranque directo del motor, que pueden hacer caer la planta.

Sobredimensionar los alternadores síncronos y sus protecciones eléctricas, para lograr la estabilidad de las plantas eléctricas, frente a los arranques severos de los grandes motores de inducción que alimentan, puede evitar sobredimensionar el motor Diesel, ya que esas corrientes de cortocircuito que duran algún segundo, toman la energía cinética de rotación del volante del Diesel y del propio rotor del alternador.

Las caídas de planta, suelen estar asociadas a una inadecuada gestión de la energía reactiva y de la potencia instantánea aportada por los generadores. Es una decisión del astillero, dimensionar correctamente la proporción entre potencias del Diesel y del alternador

### Posibles soluciones de estabilidad

La potencia en kVA de un alternador debe dimensionarse de tal forma, que sea capaz de suministrar la potencia activa eléctrica en kW total neta necesaria, en la peor de las condiciones de operación en régimen permanente del buque, siendo la potencia en kW del Diesel que lo arrastra, igual que la potencia total neta requerida por la instalación, más las pérdidas del conjunto Diesel-Alternador. Sobre este mínimo debe añadirse la potencia transitoria necesaria, que toma la energía de las inercias rodantes y la reactiva, que no provocan par resistente significativo en el eje del alternador.

Es importante que la corriente de arranque del propulsor, o del motor de inducción más grande de la instalación, no alcance nunca la de cortocircuito del alternador, porque al llegar al cortocircuito la tensión del alternador cae a cero y se pierde la capacidad de transmitir potencia eléctrica al propulsor y al resto de cargas alimentadas por dicho alternador.

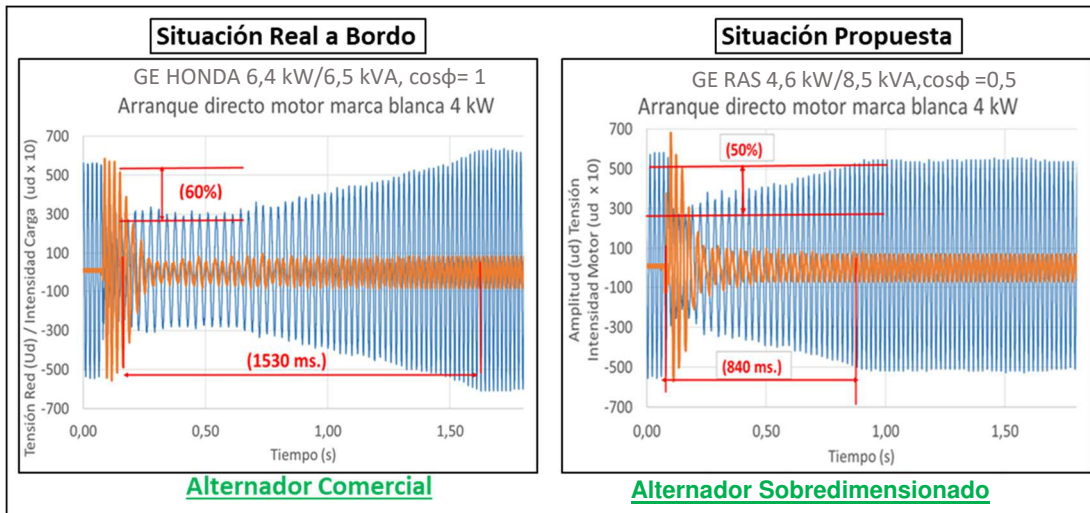
Este sobredimensionamiento, permite aprovechar la energía cinética de las masas rodantes del motor térmico y alternador, para convertirla en la energía eléctrica activa instantánea, necesaria para acelerar las inercias de los propulsores de la embarcación, en su arranque de fuerte aceleración.

Otra ventaja significativa del sobredimensionamiento de los alternadores síncronos, es su mayor capacidad de generar energía reactiva, de forma controlada por su regulador de tensión (AVR), que alimenta el devanado de excitación del campo magnético del generador síncrono, energía imprescindible para la magnetización de los rotores de los motores de inducción y que adecuadamente controlada, contribuye a la estabilidad de las plantas eléctricas. Recordemos que la energía reactiva no incrementa significativamente el par resistente ofrecido por el alternador al eje del Diesel que lo arrastra.

Veamos a continuación, el efecto positivo de este sobredimensionado en gráficas de tensión y corriente, en el arranque de un mismo motor de inducción de 4 kW, contra distintos grupos electrógenos ubicados en los laboratorios de ingeniería eléctrica (DEE), de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC).

Los grupos electrógenos mono cilíndricos utilizados fueron:

- GE HONDA Gasolina 6,4 kW / 6,5 kVA,  $\cos\phi=1$  (Comercial de referencia).
- GE RAS Gasolina 4,6 kW / 8,5 kVA,  $\cos\phi=0,5$  (Alternador Sobredimensionado)



**Fig. 51: Arranque con GE HONDA comercial 6,4 kW / 6,5 kVA,  $\cos\phi=1$  y con GE RAS HONDA Gasolina 4,6 kW / 8,5 kVA,  $\cos\phi=0,5$  (Grupo electrógeno a medida, con una talla menos de máquina térmica y una más de Alternador, respecto al anterior grupo comercial de referencia. Fuente: Propia.**

Obsérvese, como un alternador de corriente nominal de 10 A, el HONDA 6,4 kW / 6,5 kVA ve profundamente afectada tu tensión en bornes, en el arranque en vacío de un motor de inducción trifásico de potencia 4 kW / 400 V e intensidad nominal 8,5 A. Aunque aparentemente no supera a la corriente nominal del alternador de 10 A, éste no es capaz de suministrar la corriente de arranque de 70 A, pues su corriente máxima no supera los 30 A. Este conflicto hace caer la tensión a la mitad durante más de un segundo, provocando una situación crítica por la caída de tensión, que afecta el resto de cargas alimentadas por ese grupo o planta eléctrica, cuyas protecciones las habrán desconectado o tendrán disfunciones, especialmente las que estén electrónicamente reguladas. La caída de frecuencia llega a calar el motor térmico en 2 de cada 10 arranques del motor de inducción.

Tanto la diferente duración de la caída de tensión (hueco de tensión), de (0,8 s. frente a 1,5 s.), como la profundidad de la misma (50% frente al 60%), son netamente inferiores con el alternador sobredimensionado RAS, solamente una talla por encima del que le correspondería al de referencia comercial e incluso habiendo bajado una talla la máquina térmica.

### 6.1.1.2 Propulsores eléctricos de inducción, con ciclos de ola

Se analiza el comportamiento electromecánico del conjunto estudiado, a partir de las curvas de par resistente estáticas, representando lo que sucede en un instante determinado, asimilable al régimen permanente. Son necesarias como estudio previo. El comportamiento cíclico, puede implicar además efectos dinámicos, que escapan al alcance de este estudio, pues los tiempos de respuesta de los diferentes eslabones, de la cadena energética y sus controles, complican el estudio.

En las Fig. 52 a 55, se observan las curvas de par motor-velocidad e intensidad-velocidad, de un motor de inducción. En ordenadas par y corriente, en tanto por uno y en abscisas rpm. En trazo continuo verde, con alimentación del motor desde una fuente de potencia infinita y desde un grupo electrógeno, en trazo discontinuo. La curva de par resistente, representa una carga tipo hélice en régimen de navegación estable.

La diferencia positiva de la curva de par motor (curva verde) frente a la de par resistente de la carga (curva roja), se corresponde con el par de aceleración de la carga, que acelera el rotor hasta que ambas curvas se cruzan en el punto (A), denominado punto de equilibrio par- motor, par- resistente. Es aconsejable que (A) no supere el punto nominal de trabajo, al estabilizarse su corriente y velocidad de giro. En el caso (A) de nuestra experimentación, velocidad 1.460 rpm y deslizamiento  $S=2,6\%$ .

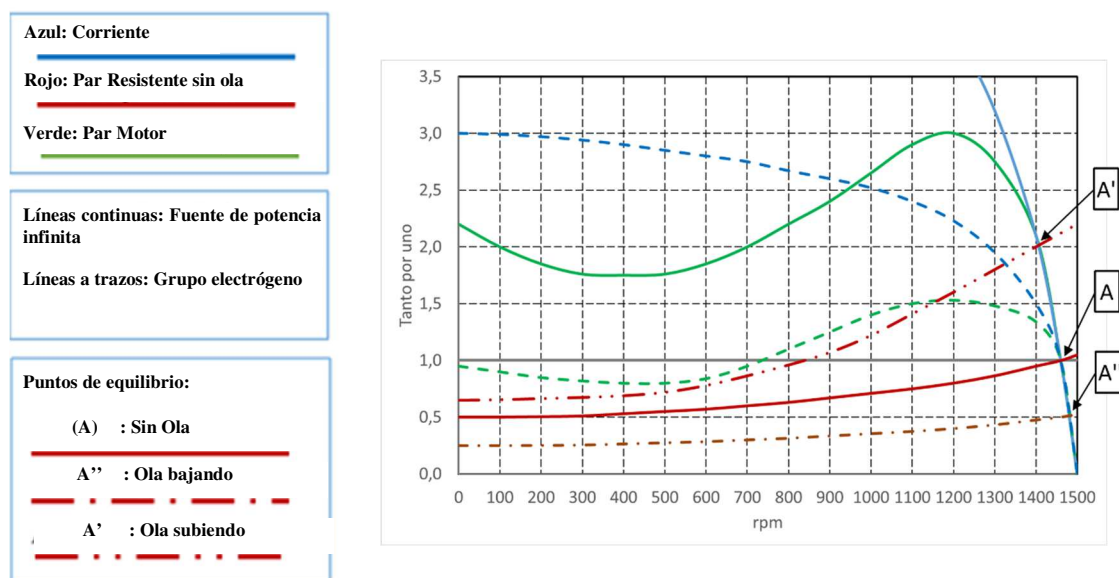


Fig. 52: Punto de Equilibrio de Par (verde) e intensidad (azul), motor de inducción con fuente infinita (línea continua) y con grupo electrógeno (línea discontinua), con Par resistente tipo hélice en régimen (rojo). Puntos de Equilibrio (A) (A') y (A'') función del tipo de ola. Fuente: Propia

En cuanto a la corriente absorbida por del motor de inducción (curva azul), alcanza un máximo de 7 veces la nominal a velocidad cero y fuente de potencia infinita, estabilizando su valor en el punto de intensidad nominal (A). Si miramos las curvas de par resistente, subiendo y bajando ola, tenemos los puntos de equilibrio (A' y A''), a los que corresponden corrientes absorbidas mayores y menores de la nominal respectivamente.

Con alimentación desde grupo electrógeno, Fig. 53, (curvas de trazo discontinuo), el alternador presenta una gran reactancia interna serie, que limita su corriente de cortocircuito, como máximo a 3 veces la corriente nominal del alternador. Esto afecta muy significativamente a las prestaciones transitorias del motor propulsor, que requieren de forma puntual corrientes importantes. Estas corrientes que el grupo electrógeno no suministra, afectan disminuyendo los pares máximos disponibles, bajando la característica par-velocidad, respecto a la verde de trazo continuo.

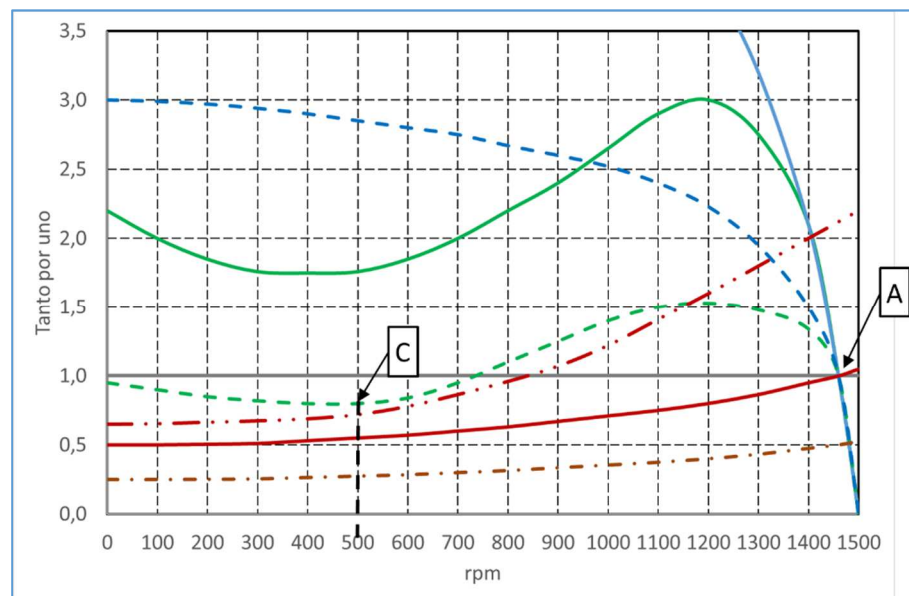


Fig. 53 Par (verde) e Intensidad (azul), Motor Eléctrico de inducción, con la curva de Carga de Hélice (rojo) en régimen estable, alimentación por grupo electrógeno (trazo discontinuo), Punto de Equilibrio (A), Punto Crítico (C). Fuente: Propia.

Con régimen de navegación estable (sin ola), la nueva curva par velocidad de trazos verdes, queda ligeramente por encima del par de carga sobre 500 rpm, punto (C), por lo que continuará su aceleración hasta el punto de funcionamiento nominal (A), estabilizándose en él.

Si la carga aumenta por condiciones de subida de una ola, la curva de carga (roja) pasa a ser la de trazo continuo más grueso.

En este caso las curvas de par motor con potencia infinita (verde) y par resistente de la carga (roja a trazos), se cruzan en el en torno a 1.400 rpm, punto (B) Fig.54, en el cual el motor se estabilizaría, pero con una corriente más alta (curva azul), del orden de 2 veces su corriente nominal, debido a que está venciendo un par, también superior al nominal.



## Posibles soluciones de estabilidad

El efecto joule calienta el motor en función de  $P=I^2 \cdot R \cdot t$ , que en términos de energía resulta una función  $R \cdot I^2 \cdot \text{tiempo}$ .

El calentamiento  $R \cdot I^2 \cdot t$  del motor, puede compensarse en un comportamiento cíclico con la relajación de corrientes y pares resistentes al bajar la ola (curva roja a trazos), en torno a 1.480 rpm, punto (E) Fig.54. Este funcionamiento del propulsor, resulta admisible y puede generar un importante ahorro de combustible en el motor Diesel.

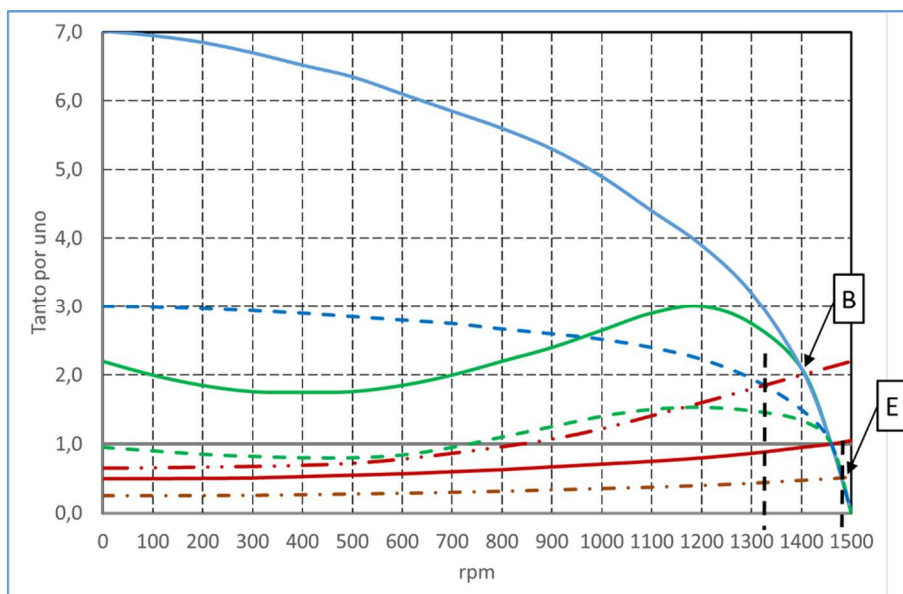


Fig. 54: Zoom de Par (verde) e Intensidad Arranque Motor Eléctrico de inducción (azul) con la curva de Carga de Hélice en régimen de sobrecarga, alimentación por grupo electrógeno (curvas a trazos). Límite de Carga (D). Fuente: Propia.

En el caso de alimentación desde grupo electrógeno y sobrecarga, Fig. 55, (curva roja discontinua de trazo grueso) el par de carga supera al par motor en el punto (D) a 1.170 rpm, deteniéndolo en este punto, aunque no es un punto de trabajo recomendable en permanencia, ya que tenemos un deslizamiento del 22% y una gran corriente cercana a 2,5 veces la nominal, pues viene limitada por el grupo electrógeno.

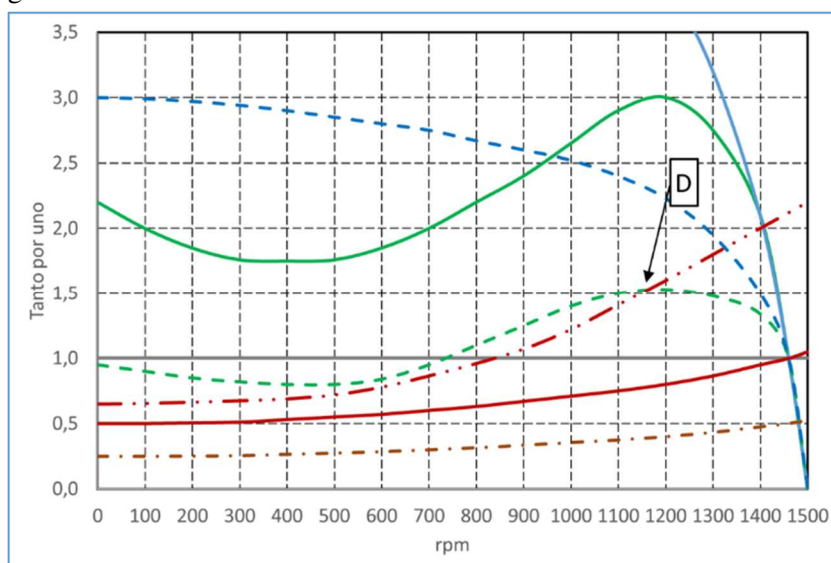


Fig. 55: Par (verde) Intensidad Motor Eléctrico de inducción (azul trazo continuo) con la curva de Carga de Hélice en régimen de sobrecarga (rojo grueso) y bajando ola (rojo a trazos), alimentación fuente infinita. Subida Ola (B), Bajada Ola (E). Fuente: Propia.

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Para tener siempre un buen par de aceleración, el par motor debe ser superior al par de la carga.

Sobredimensionando los alternadores, la tensión resulta más estable y la curva par-velocidad no pierde prestaciones, para de esta manera acercarse lo más posible a las condiciones de funcionamiento con red de potencia infinita (red terrestre), en la que los motores eléctricos arrancan rápidamente sin huecos de tensión apreciables.

Este sobredimensionamiento no es tan caro como parece, pues el motor Diesel es el dispositivo económicamente más elevado del conjunto Diesel-Generador.



### 6.1.2 Condensadores (Reactiva Q)

Los grupos de condensadores comerciales de esta gama, suelen ser de potencias medias unitarias hasta 250 kVAR. Normalmente son utilizadas en sistemas muy dinámicos, por sus velocidades de carga y descarga eléctrica elevadas.

Son adecuadas para descargas muy cortas, con mucha frecuencia, pero de pequeña potencia.

El refuerzo de potencia instantánea en situaciones de fuerte demanda, tales como el arranque de un motor de inducción de gran potencia, como suele ser el de la hélice transversal de proa, partiendo de un correcto dimensionado del Alternador, lo podemos complementar mediante grupos de condensadores, aunque está en el límite de la aplicación, de la misma forma que en las prensas eléctricas que se complementan con motores de alta inercia. Los lanza misiles y otro armamento militar, que requieren de gran potencia instantánea, pueden ser buenos ejemplos de aplicación.

**Los Condensadores** tienen las siguientes características especiales:

- Alta velocidad de carga y descarga, lo que los hace adecuados para necesidades instantáneas de potencia y energía.
- Su tensión baja a medida que se descargan, provocando poca duración de suministro de potencia y dificultades de control.
- Pueden suministrar energía reactiva dando estabilidad al sistema.
- Son capaces de descargar grandes corrientes, durante un breve periodo de tiempo.
- Sus potencias están limitadas según las aplicaciones.

El riesgo con los condensadores asociados a la compensación de energía reactiva de motores de inducción, es que estos conjuntos se puedan desconectar de la red, o planta eléctrica, mientras estén girando, y entonces pasan a auto excitarse, trabajando como generadores de inducción, con la tensión y frecuencia descontrolados. Esta tensión de autoexcitación, si es superior a la nominal, puede resultar destructiva.

Una vez determinada la potencia en kVAR de los grupos de condensadores, deberemos siempre calcular dos factores importantes por Potencia y por Seguridad:

**“La Capacitancia” y “La Resonancia “.**

Para el cálculo de **Capacitancia** de la batería, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C (F) = (2 * E (J)) / (V_{alt}^2 - V_{baj}^2)$$

**Ecuación ( 33) Capacitancia de una batería de condensadores.**

Siendo

C (F), la Capacitancia del grupo de condensadores en Faradios y E su energía en Julios.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

$V_{alt}$ , la máxima Tensión a la que queremos que se cargue.

$V_{baj}$ , la Tensión normal del Bus. Suele ser de 600 Vdc.

Teniendo en cuenta que para 400 Vac, el grupo de condensadores se cargará a una  $V_{dc} = 565$  Vdc ( $400 * \sqrt{2}$ ), que es la tensión de pico correspondiente a la senoide de 400  $V_{ef}$ , que alimenta al rectificador, que carga los condensadores con CC a partir de AC.

Cuando hay un Convertidor de Frecuencia en la instalación, se puede aprovechar la capacitancia de sus condensadores:

C del grupo condensadores:

$$C_{\mu F} = C_{\mu F_{total}} - C_{(VSD)} \mu F$$

**Ecuación ( 34 ) Capacitancia total de una batería de condensadores.**

Por ejemplo: Si se necesita un valor de 45000 ( $\mu F$ ) y el drive tiene 6000 ( $\mu F$ ), entonces el grupo necesario sería de 39000 ( $\mu F$ ).

Para calcular **la Resonancia** se procede así:

Cálculo de Resonancia con la red:

$$L (\mu H) = L_{dc} (\mu H) + 2 * Lac (\mu H)$$

**Ecuación ( 35 ) Resonancia de una batería de condensadores.**

como la inductancia puede estar en la parte AC, o DC, o en las dos, ponemos la afectación a cada una.

$$\text{Resonancia (Hz)} = 1E12 / (2 * \pi * \sqrt{L(\mu H) * C (\mu F)})$$

**Ecuación ( 36 ) Resonancia en Hz de una batería de condensadores.**

El exponente 12 es por las unidades, si usamos (H) y (F), sería 1.

La frecuencia de resonancia del grupo de condensadores deberá estar alejada de la frecuencia de la alimentación, para así evitar su entrada en resonancia. Los márgenes de frecuencia de resonancia recomendados son los siguientes:

F alimentación      Hz +/- 5 Hz

2\*F alimentación    Hz +/- 20 Hz

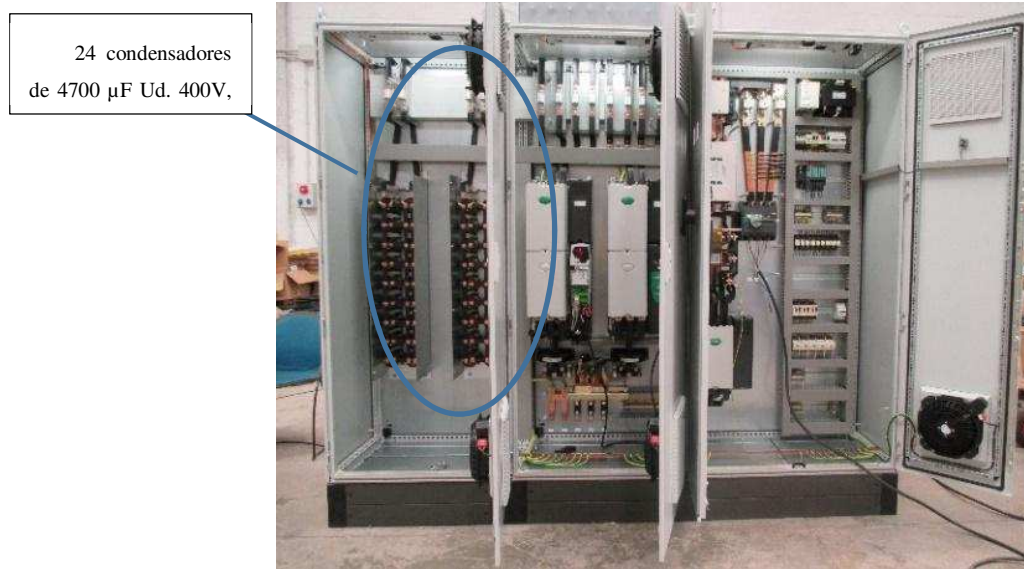
6\*F alimentación    Hz +/- 20 Hz

Si la Frecuencia de alimentación es 50 Hz, se hará que la resonancia no esté entre 45-55, ni 80-120, ni 280-320, porque con el envejecimiento las capacidades pueden variar con el tiempo.

Para 60 Hz de alimentación los valores a prohibir, serían 55-65, 100-140, 340-380.

## Posibles soluciones de estabilidad

Una foto típica de un montaje de una batería de condensadores Fig. 56, formada por un grupo de 24 condensadores de 4700  $\mu\text{F}/\text{Ud}$  (cuerpo de la izquierda), en un armario eléctrico de potencia 260 kW / 400 V, equipado con convertidor de frecuencia y sus protecciones, se observa a continuación:



**Fig. 56:** Armario eléctrico con grupo de Condensadores, montado en el cuerpo izquierdo. Fuente: Propia.

Los condensadores de mucha potencia, no son aconsejables a bordo, pue las oscilaciones de la frecuencia generada por la planta, durante los transitorios de arranque del motor de proa, por ejemplo, pueden alcanzar las frecuencias de resonancia de los condensadores.

### 6.1.3 Volantes De Inercia. Potencia activa P y su control electrónico (Q).

Los **volantes de inercia** han sido utilizados durante siglos en numerosas aplicaciones, cumpliendo la función de acumular energía cinética, para:

- Almacenar energía de rotación, a fin de poderla utilizar en cualquier momento.
- Amortiguar impactos torsionales de carga o tracción.

En aplicaciones industriales y deportivas este sistema es muy utilizado.

Un ejemplo mediáticamente relevante, se produjo al limitar la potencia en los motores de los coches de Fórmula 1. Los KERS “*Kynetic Energy Recovery System*” resultaron adecuados, para que, en un momento determinado, se pudiera disponer de potencia extra, a la salida de una curva con la energía de frenado almacenada a la entrada de la misma curva. Se experimentaron varias tecnologías y soluciones constructivas, para ir madurando la tecnología.

Los volantes de inercia, se incorporan actualmente en muchas de las arquitecturas de máquinas. Como ejemplos, citaremos los motores de combustión interna, las prensas y forjas, así como los pequeños mecanismos de relojería, modelismo, etc. En definitiva, en todos aquellos mecanismos en los que deseemos obtener regularidad y estabilidad en la velocidad de rotación.

Los volantes de inercia aportan energía activa pura, por la conversión de la energía cinética acumulada en energía eléctrica durante el proceso de frenado, sin embargo, los sistemas regenerativos electrónicos como el que en esta tesis se propone, como elemento de estabilidad de las plantas eléctricas, aportan además energía reactiva, siendo ajustable electrónicamente mediante parámetros residentes en el convertidor de frecuencia electrónico regenerativo.

Las principales ventajas de los acumuladores cinéticos de energía eléctrica, son:

- Alta densidad de Energía.
- Muy alta repetitividad de las descargas, se estiman en 90.000 ciclos.
- Fácil medida del estado de carga. Función directa de la velocidad.
- Muy bajo mantenimiento.
- Respuesta muy rápida.
- Escalable en potencias.
- Bajo impacto medio ambiental.
- Larga vida de las instalaciones > 20 años.

Los 6 parámetros que definen un acumulador cinético de energía eléctrica, son:

## Posibles soluciones de estabilidad

**Capacidad de almacenamiento**, es la cantidad de energía que es capaz de almacenar ( $W_{st}$ ), y que difiere siempre de la que puede descargar ( $W_{ut}$ ), dependiendo del punto de trabajo en el momento de la descarga y que obviamente siempre es inferior.

**Potencia disponible**, mide la cantidad media de potencia capaz de ser entregada o absorbida en los ciclos de carga y descarga, se expresa en valor de pico ( $P_{max}$ ).

**Tiempo de descarga  $\tau(s)$** , se define por la siguiente expresión:

$$\tau(s) = W_{st} / P_{max}$$

**Ecuación ( 37 ) Tiempo descarga s. de un acumulador cinético.**

$\tau(s)$ : Tiempo de descarga en segundos

$W_{st}$ : Energía total almacenada en Wh

$P_{max}$ : Máxima Potencia de Pico en ciclos de carga y descarga disponible en un punto de trabajo determinado en W.

**Eficiencia de la tecnología de almacenamiento ( $\eta$ )**, se expresa como cociente entre la energía entregada y la almacenada.

$$\eta = W_{ut} / W_{st}$$

**Ecuación ( 38 ) Eficiencia de un acumulador cinético.**

$W_{ut}$ : Energía útil almacenada en Wh

**Durabilidad**, definido como el número de veces que el dispositivo puede descargar energía, desde el nivel para el cual fue diseñado, se expresa como el número máximo de ciclos completos de carga y descarga capaz de realizar, N.

**Tiempo de descarga útil**, indica el tiempo máximo que el dispositivo es capaz de entregar energía continuamente de manera útil, se expresa con la siguiente expresión:

$$t = W_{ut} / P_{dt}$$

**Ecuación ( 39 ) Autonomía de un acumulador cinético.**

t: Tiempo en horas h.

$P_{dt}$ : Potencia máxima de descarga en W.

Estos parámetros se complementan con la:

- Densidad de Potencia, expresada en W/Kg.
- Densidad de Energía, expresada en Wh/Kg.
- Valores típicos de los volantes de inercia son:
  - Rangos de potencia hasta 4 MW.
  - Rangos de energía hasta 100 MWh
  - Densidades de potencia muy altos, del orden de 30-600 W/kg.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

- Densidades de energía muy altos, del orden de 5-80 Wh/kg.
- Vida casi independiente del número de ciclos de carga y descarga.
- Tiempos de carga y descarga desde segundos.
- Bajo mantenimiento e impacto medioambiental.

La energía cinética de un volante de inercia, la calculamos como:

$$E_c = (1/2) * J * \omega^2;$$

**Ecuación ( 40 ) Energía Cinética acumulada en un acumulador cinético.**

J: Momento de Inercia del acumulador

$\omega$ : Velocidad angular

La energía máxima que un acumulador puede almacenar, está limitada por la integridad mecánica del material, por lo tanto, la densidad máxima de energía específica que puede almacenarse en un volante de inercia viene dada por la expresión:

$$Esp = K_s * (\sigma_m / \rho)$$

**Ecuación ( 41 ) Densidad de energía específica almacenable en un acumulador cinético.**

Esp: Densidad de energía específica

$\sigma_m$ : Máxima resistencia mecánica del volante

$K_s$ : Factor de forma

$\rho$ : Densidad del material del volante

El momento de inercia J, lo formulamos como:

$$J = \int (1/2) * m * r^2 dr.$$

**Ecuación ( 42 ) Momento de Inercia de una masa puntual girando con radio r.**

Cabe destacar que la energía acumulada es proporcional al cuadrado de la velocidad y, por tanto, el factor velocidad marca principalmente la capacidad de almacenaje de energía.

Existen dos grandes grupos de acumuladores cinéticos, los que no superan 10.000 rpm, que pueden ser de materiales pesados y los que las superan, llegando hasta 100.000 rpm en cuyo caso son materiales composite o parecidos, materiales ligeros y de alta robustez, para que, si estallan por fuerza centrífuga, lo hagan en trozos minúsculos, que minimicen el daño potencial. En este último caso Fig. 57 los volantes se suelen suspender magnéticamente, además de utilizar cabinas cerradas especiales al vacío, para evitar pérdidas aerodinámicas, dando protección y seguridad en su entorno. La suspensión magnética se realiza para evitar los desgastes prematuros de los rodamientos y evitar las grandes pérdidas de energía por rozamiento mecánico, que definen el tiempo que puede mantenerse girando, sin disminución apreciable de  $\omega$ .

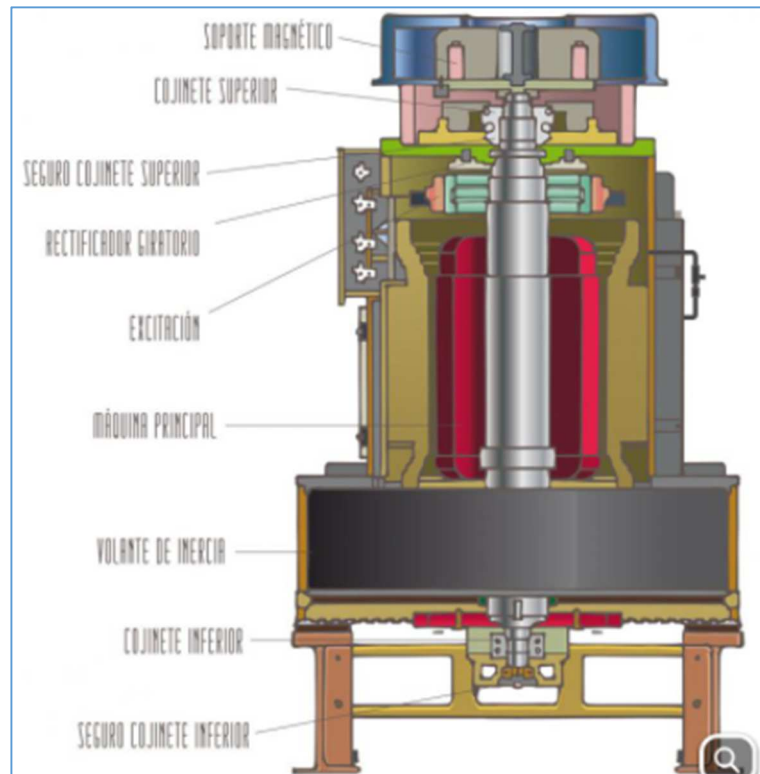


Fig. 57: Esquema de un acumulador cinético de 3ª generación. Fuente: REE

En nuestro caso hemos elegido la velocidad baja de 1500 rpm, por la facilidad del montaje, economía y seguridad de la máquina.

Los volantes de inercia tienen la ventaja, de poder suministrar una gran cantidad de energía en un tiempo relativamente corto, entre fracciones de segundo y horas de forma orientativa, permite actuar repetidamente sin desgastes y con relativamente poco mantenimiento. Son fácilmente escalables en potencia, de ubicación fácil y por tanto adecuados para suministrar energía eléctrica extra, en periodos transitorios de sobrecargas y / o huecos de tensión.

Como elemento principal para responder a la demanda de potencia eléctrica instantánea, consideramos como solución de refuerzo, los **Acumuladores Cinéticos de Energía Eléctrica** (ACEE), que son volantes de inercia asociados a una máquina eléctrica reversible, capaz de trabajar como motor acelerando el volante o como generador frenándolo y transformando la energía cinética de rotación del volante, a tensión y corriente eléctrica  $V$  e  $I$ , respectivamente.

## 6.2 PROPUESTA EXPERIMENTAL PARA ENSAYO EN ESTE TRABAJO

Los (ACEE) están basados en motores de alta inercia, normalmente de Inducción por su menor coste, con un sistema de regulación electrónico de 4 cuadrantes, que permite el frenado regenerativo. Mediante un programa de lógica interna, controla y regula la descarga de energía y su devolución a la red, reforzando así la fuente generadora de tensión.

Una versión más económica es disponer de dos convertidores de frecuencia de 1 cuadrante, enlazados por el Bus DC, uno el “*Motoring*” que acelera y frena el volante de inercia y otro el “*Regen*” que es el responsable de la descarga controlada y sincronizada a la red de la energía que le devuelve el “*Motoring*” en la fase de frenado.

Toda esta operación es controlada desde un programa de Plc interno, que navega en el propio convertidor de frecuencia “*Motoring*”.

Para iniciar el frenado regenerativo (descarga de energía), se han ensayado experimentalmente diversas variables, siendo las más significativas:

- El incremento del nivel del Bus DC.
- La bajada de la frecuencia de la tensión del alternador.
- El aumento de intensidad de consumo de la carga.
- y finalmente la caída de la tensión del alternador,

Sin embargo, todas ellas suceden varios periodos (<80 ms.) después del arranque del motor, con lo cual la descarga de energía, se produce con retraso al primer transitorio de arranque, que es cuando más cae la tensión de red. Por todo ello nos enfocamos finalmente a un sistema “anticipativo regulable”, que nos permite hacer ajustes, para lograr que el máximo de la descarga coincida con el máximo del hueco de tensión y así obtener el mejor resultado para reducir la caída de esta. Es un escenario viable a bordo, con un control adecuado.

Para descargar en sincronismo a la red y en el momento oportuno, la energía acumulada en el volante de inercia, el segundo convertidor de frecuencia “*Regen*”, escanea frecuencia y tensiones de la red (valor y fase) continuamente.

En los ensayos experimentales de esta tesis, se ha observado como la energía descargada en forma de corriente, se modula sinusoidalmente, mediante condensadores y reactancias diseñadas “*ad hoc*” por el fabricante del sistema, pudiéndose modificar el % de reactiva que se inyecta.

Esta energía es aportada por los condensadores de los dos convertidores de frecuencia marca Unidrive M701-05400270 (780  $\mu$ F/Ud) que constituyen el sistema regenerativo y el condensador específico SFF, estabilizado todo ello con las inductancias montadas en el mismo sistema regenerativo:



### Posibles soluciones de estabilidad

“*Regen Inductor*”, ref 4401-0408, 2400 mH, 25 A.

“*SFF Inductor*”, ref 4401-0165, 1200 mH, 25 A.

“*SFF Capacitor*”, ref 1610-8104, 10  $\mu$ F, 15 A.

Un alternador síncrono, puede actuar como volante de inercia, que traduce directamente sus parámetros mecánicos ( $\omega$ ,  $\Gamma$ ) a parámetros eléctricos (V, f, I). Sobredimensionarlo, respecto del Diesel que lo arrastra, en una planta eléctrica a bordo, puede ser útil cuando un motor de inducción arranca, para evitar desestabilizar la frecuencia y tensión de salida del mismo.

También puede tener una contribución importante para resolver los micro cortes de tensión y las deformaciones de onda debidas a componentes armónicos. Dada la brevedad de estos fenómenos, la inercia del volante del Diesel y del propio alternador, acumulan energía suficiente y no solicita par significativo al Diesel que lo arrastra.

Como conclusión de lo comentado anteriormente, la solución de óptima estabilidad eléctrica, es un alternador de potencia superior que la del Diesel que lo arrastra y capaz de alimentar la máxima corriente demandada puntualmente por la carga instalada, con  $\cos \phi=0,4$ . si la carga son motores de inducción.

La máxima corriente de la carga, y por tanto su protección magnetotérmica no debería superar  $2,5 I_N$  del alternador, ni que sea durante milisegundos, para evitar que la tensión del alternador se desplome durante esos episodios, como se ha evidenciado experimentalmente.

La energía reactiva, requiere de un adecuado sistema de regulación de la tensión (AVR) en el alternador. Este sobredimensionado del alternador, respecto al Diesel que lo arrastra, para hacer frente a transitorios de corriente reactiva, está considerado caro por parte de algunos astilleros, que no tienen en cuenta el riesgo que asumen, sacrificando sin saberlo, la estabilidad de las plantas que instalan.

6.2.1 Propuesta de Acumulador Cinético de Energía Eléctrica (ACEE), para Plantas de Generación Eléctrica Navales. Prototipo para experimentación en la gama 10 kW

El concepto en el que se basa el diseño y la realización del prototipo, que se ha construido en el laboratorio de ingeniería eléctrica (DEE), de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, de Barcelona (ETSEIB/UPC), para esta Tesis, ha sido jerarquizar las cargas a bordo:

- Diseñar los servicios críticos y esenciales alimentados separadamente mediante tensión CC de 12 V suministrados por baterías.
- El resto de servicios (principales, interrumpibles excedentes) lo alimenta la planta eléctrica estudiada.
- La planta eléctrica de referencia es de 6,4 kW / 6,5 kVA simulada de la embarcación experimental LADY.
- Es un prototipo pensado para una cadena energética de propulsión eléctrica híbrida serie, con dos propulsores eléctricos de inducción de 2,2 kW, IP68, es decir motores sumergidos.
- Sistema regenerativo, que fuera capaz de proporcionar los picos de energía necesarios.
- El grupo comercial de referencia utilizado es de la marca Honda (gasolina) de una potencia de 6,4 kW / 6,5 kVA, equivalente al montado en la embarcación “LADY”, que es un HYUNDAI Diesel insonorizado de la misma potencia.

Tabla 6 Grupos electrógenos con los que se han realizado las pruebas de laboratorio.

Identificador	Fabricante Motor/Alternador	Tensión III	Frecuencia	Potencia Motor Nominal	Potencia Alternador	I <sub>N</sub> III (placa)	I <sub>cc</sub> III (estimada)
HONDA Comercial	Honda/Honda ECMT 6500K1 6,4 kW / 6,5 kVA	13.0 400 V	50 Hz	6,4 kW	6,5 kVA	10 A Cosφ=1	30 A
RAS Especial modificado	Honda/Tekel GX 270 9.0 TT 4,6 kW / 8,5 kVA	9.0 400 V	50 Hz	4,6 kW	8,5 kVA	12,3 A Cosφ=0,5	37 A
HYUNDAI Diesel Insonorizado	Hyundai 13 CV / 6500 6,5 kW / 6,5 kVA	400 V	50 Hz	6,5 kW	6,5 kVA	9,4 A Cosφ=1	28 A

## Posibles soluciones de estabilidad

Las características de los motores de inducción utilizados son:

**Tabla 7 Motores eléctricos de inducción con los que se han realizado las pruebas de laboratorio.**

Fabricante	Tensión III	Frecuencia	Potencia	$I_0$	$I_N$	$I_S$	Inercia Kgm <sup>2</sup>
ABB	400 V	50 Hz	3 kW	4 A <sub>rms</sub> (medido)	6,3 A <sub>rms</sub> (placa)	42,9 A <sub>rms</sub> (medido) (6,8 * I <sub>N</sub> )	0,0115 Ficha técnica
Novat (Consideramos marca Blanca)	400 V	50 Hz	4 kW	5,1 A <sub>rms</sub> (medido)	8,5 A <sub>rms</sub> (placa)	70 A <sub>rms</sub> (medido) (8,3 * I <sub>N</sub> )	0,02644 calculado
ABB Ventilador	400 V	50 Hz	0,75 kW	0,8 A <sub>rms</sub>	1,9 A <sub>rms</sub>	17 A <sub>rms</sub>	-
Propulsores LADY, marca TESLA	400 V	50 Hz	2 x 2,2 kW	-	2 x 5,5 A <sub>rms</sub>	2 x 23 A <sub>rms</sub>	-

El motor Novat 4 kW en su arranque directo ( $I_S$ : 70 A), cala en alguna ocasión el motor térmico del grupo HONDA 6500 ( $I_{CC}$ : 30 A), ya que los 30 A suministrados por el alternador como corriente de cortocircuito, ( $3 * I_N$ ), generan un par resistente sobre el eje del motor térmico que lo arrastra, tres veces superior al nominal durante más de un segundo. Este par resistente hace bajar la velocidad del cigüeñal por debajo de la adecuada para llegar a la siguiente compresión. Cala el motor térmico en dos de cada diez arranques de propulsión.

Se han realizado también estas mismas pruebas con el grupo de generación modificado “RAS” (4,6 kW / 8,5 kVA), obteniendo un significativo mejor comportamiento transitorio, tanto en profundidad del hueco de tensión como en el tiempo de recuperación.

La propuesta de este trabajo, tiene por objetivo minimizar el impacto de las grandes cargas, singulares o cíclicas (especialmente procedentes de arranques de motores de inducción), que pueden provocar caídas de planta eléctrica, mediante la instalación en paralelo al grupo de generación, de acumuladores cinéticos de la potencia necesaria y ajustados para descargar esa energía, justo en el transitorio de arranque de esas cargas cíclicas, para evitar las caídas de planta.

### 6.3 ANÁLISIS DE CONTROL Y PROTECCIONES

La corriente en vacío ( $I_0$ ) del motor eléctrico de inducción, es la que absorbe sin tener ningún par en el eje, girando cerca de la velocidad de sincronismo. Es perfectamente asumible en nuestro conjunto experimental por el motor térmico y por el alternador,  $65\% I_N$ , a pesar de ser muy inductiva.

Se representa en la Fig. 58, con la misma escala y mismos ejes, los transitorios de los siguientes arranques directos en vacío de un mismo motor de inducción de 4 kW:

- Intensidad motor Novat Fuente Infinita. (negro)
- Intensidad motor Novat Grupo Comercial Honda. (Rojo)
- Intensidad motor Novat Grupo RAS. (Azul)
- Intensidad motor Novat Grupo Honda + (ACEE) (anticipación 80 ms.). (Verde)

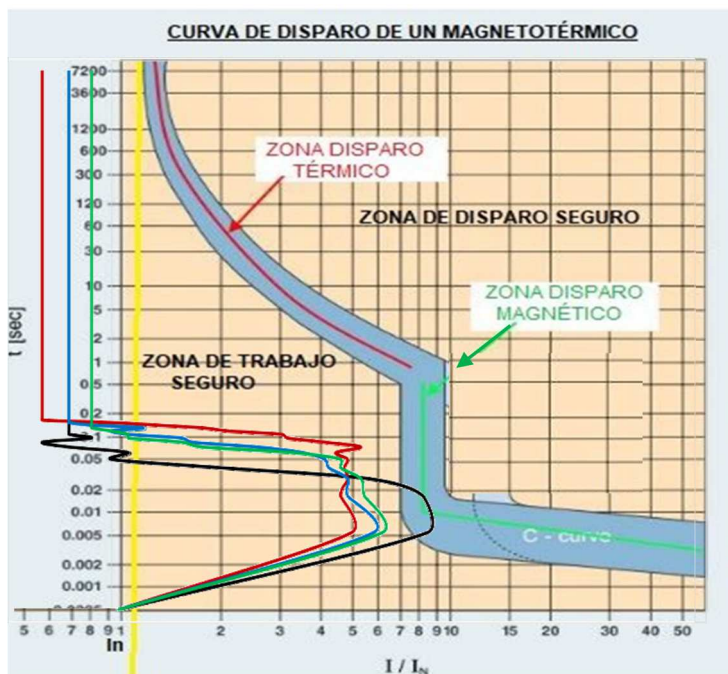


Fig. 58: Registros de Intensidad de diferentes arranques del motor Novat 4 kW, sobre la curva de disparo de un Magnetotérmico. Fuente: Teoría General de Máquinas Eléctricas, (M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-Badias).

Se observa como en el registro de estos transitorios de arranque, las corrientes consumidas superan las 3 veces la corriente nominal que el alternador puede suministrar, llegando hasta las 6,5 veces en algún caso, debidos a la asimetría de la fase que se mide del transitorio, en el momento de la conexión. (Cortés-Cherta, Corrales-Martín and Ensenyat-Badias, 1991)

## Posibles soluciones de estabilidad

**Tabla 8 Duración e intensidad del transitorio simétrico y asimétrico de arranque del motor Novat con diversas fuentes de energía.**

Fuente de Energía/Grupo Electrógeno	Código de color	Duración Transitorio de Arranque	Corriente máxima Arranque simétrico $I/I_N$	Corriente máxima Arranque asimétrico $I/I_N$
Infinita	Negro	50 ms	9	15
Honda comercial 6,5 kVA	Rojo	150 ms	3	5
RAS especial 8,5 kVA	Azul	120 ms	3	6
Honda comercial + (ACEE)	Verde	100 ms	3	6,5

Cuando no hay limitación de corriente máxima en términos de fuente de energía, el motor toma de la red hasta 9 veces su corriente nominal arrancando en 50 ms., la cual se limita en el caso de estar alimentado por grupos electrógenos convencionales, alargando el tiempo de arranque. Esta alta corriente de arranque de corta duración, puede generar disparos intempestivos de las protecciones, dimensionadas para grupo electrógeno.

En el caso de fuente infinita, la curva de intensidad de arranque (curva negra), sobrepasa en ocasiones el límite de la zona segura de trabajo, provocando alguna vez disparos de las protecciones.

La intensidad de arranque es variable en cada transitorio, debido a posibles asimetrías en la corriente consumida por fase, que viene afectada por el momento de cierre del contacto que la gobierna y también debido a una senoide deformada por componentes armónicos.

En los otros dos casos de grupo electrógeno, curvas roja y azul, a medida que se aumenta la potencia del alternador en kVA, la corriente aumenta y la duración del arranque se reduce, pues mejora la relación electromagnética entre generador y cargas.

Finalmente, curva verde, GE + (ACEE) se reduce la duración del transitorio de arranque, con la entrada del sistema del acumulador cinético de energía eléctrica, obteniéndose los mejores resultados.

## 6.4 RESUMEN

Como conclusión de este capítulo, se formulan propuestas de “Posibles Soluciones de Estabilidad” en los siguientes aspectos técnicos:

1. Sobredimensionar los alternadores en kVA del orden de 2,5 veces, respecto a las maquinas térmicas que los arrastran en kW, o lo que es lo mismo, dimensionar los grupos electrógenos para  $\cos \phi=0,4$ . Este sobredimensionado puede ser mucho menor siempre que la corriente de cortocircuito del alternador, esté por encima de la corriente de arranque del motor eléctrico más grande de la instalación. Si hay en la instalación distorsión armónica y posicionamiento dinámico, se puede llegar a un  $\cos \phi=0,2$ , es decir los kVA del alternador deberán ser 5 veces la potencia de la máquina Diesel que le arrastra.
2. Dimensionar las protecciones magnetotérmicas de los alternadores, para que le permitan trabajar a su máxima corriente de sobrecarga, durante los transitorios de arranque, sin disparos intempestivos.
3. Incorporar un acumulador cinético de energía eléctrica, (ACEE), especialmente en instalaciones ya existentes, donde la sustitución del alternador por otro de mayor potencia resulte de difícil y/o de costosa ejecución. Este aumento de intensidad transitoria del alternador + (ACEE), debe ir acompañado del adecuado ajuste de las protecciones, en los tramos de la instalación por donde circulen las corrientes transitorias de arranque de los mayores motores de inducción.
4. Complementar los acumuladores eléctricos de energía cinética (ACEE), con grupos de condensadores para aumentar la potencia instantánea, la reactiva y la velocidad de reacción de la descarga de energía del sistema, para compensar las caídas de tensión impuestas por el arranque de grandes motores de inducción.

## 7 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL DESARROLLADA EN EL LABORATORIO DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE BARCELONA (ETSEIB-UPC)

### 7.1 MOTORES DE INDUCCIÓN EMPLEADOS PARA EMULAR LOS PROPULSORES

Se han utilizado entre otros, los siguientes motores de inducción:

#### **Propulsor “Novat”.**

Características de placa:

- Fabricante: Novat
- Talla: 112 M
- Tensión nominal: 400 V
- Intensidad nominal: 8,5 A
- Potencia nominal: 4 kW
- Velocidad nominal: 1.420 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío:  $I_{\text{vacío}}$ : 5,1 A (medida tapando el flujo de aire del ventilador)
- Corriente de arranque:  $I_{\text{arranque}}$ : 70 A (medida)
- Inercia: 0,02644 kgm<sup>2</sup> (calculada a partir de ensayos)

#### **Propulsor “ABB”.**

Características de placa:

- Fabricante: ABB
- Talla: 100 LD
- Tensión nominal: 400 V
- Intensidad nominal: 6,3 A
- Potencia nominal: 3 kW
- Velocidad nominal: 1.445 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío:  $I_{\text{vacío}}$ : 4,0 A (medida tapando el flujo de aire del ventilador)
- Corriente de arranque:  $I_{\text{arranque}}$ : 42,9 A (medida)
- Inercia: 0,0115 kgm<sup>2</sup> (dato de la ficha técnica) se toma como referencia para determinar el resto de inercias

### **Propulsor Ventilador “ABB”.**

A fin de aumentar la inercia del conjunto (carga), se utilizó este motor ventilador para ensayos.

Características de placa:

- Fabricante: ABB
- Talla: 100 LD + 80 A
- Tensión nominal: 400 V
- Intensidad nominal: 1,9 A
- Potencia nominal: 0,75 kW
- Velocidad nominal: 2.850 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío:  $I_{\text{vacío}}$ : 0,8 A (medida tapando el flujo de aire del ventilador)
- Corriente de arranque:  $I_{\text{arranque}}$ : 17 A (medida)

### **Conjunto Propulsor “ABB” + Propulsor Ventilador “ABB”.**

Características de placa:

- Fabricante: ABB
- Tensión nominal: 400 V
- Intensidad nominal: 8,2 A
- Potencia nominal: 3,75 kW
- Velocidad nominal: 1.445 & 2.850 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío:  $I_{\text{vacío}}$ : 4,8 A (medida) tapando el flujo de aire del ventilador
- Corriente de arranque:  $I_{\text{arranque}}$ : 50 A (medida)



7.2 (GE) EMPLEADOS, (AVR) SU ALIMENTACIÓN Y REALIMENTACIÓN PARA EL CONTROL

Tabla 9 Listado de los Grupos electrógenos a 50 Hz, utilizados en este trabajo.

Grupo Electrógeno	Motor primario/Motor eléctrico kW/kVA	V	Cos $\phi$	$I_0 / I_{ex}$ A	$I_N / I_{ex}$ A	$I_{MAX} / I_{ex}$ A
HONDA ECMT13.0 6500/GX390 (comercial)	6,4/6,5	400	1	0 / 1,2	10 / 4	30 / 12
HONDA RAS 9.0 (especial modificado) TEKEL/GX 270	4,6/8,5	400	0,5	0 / 1,3	12,3 / 4,5	37 / 14
ESTRIBOR 15 kVA Excitación manual	15/15	220	1		39 / 11	120
BABOR 15 kVA Excitatriz con AVR	15/15	220//110	1		39 / 11	120

El alternador del GE Estribor 15 kVA Excitatriz, dispone de la posibilidad de excitación manual y está autoalimentado.

La información técnica de los GE Honda y sus corrientes de excitación, ha sido extraída de la fuente original Honda (Honda, 2016)

El alternador del GE Babor 15 kVA Excitatriz, dispone de (AVR) con alimentación externa 230V.

Se han hecho algunos ensayos con alternadores más grandes, para visualizar la importancia de los (AVR) y su alimentación, en los transitorios de arranque de los propulsores, adaptando las tensiones con un transformador trifásico.

7.2.1 Grupo electrógeno  $\cos\phi=1$ , HONDA 6,4 kW/ 6,5 kVA

Representa la proporción comercial común, entre motor térmico y alternador, considerada la más económica. Se denomina ECMT 6500 13.0, e incorpora la máquina térmica Honda GX 390, 6,4 kW y el alternador correspondiente, 6,5 kVA.

Dispone de control de frecuencia mecánico centrífugo.

El control de tensión (AVR) es electromagnético, por saturación de un transformador auxiliar, que incluye excitación por corriente, según el esquema siguiente:

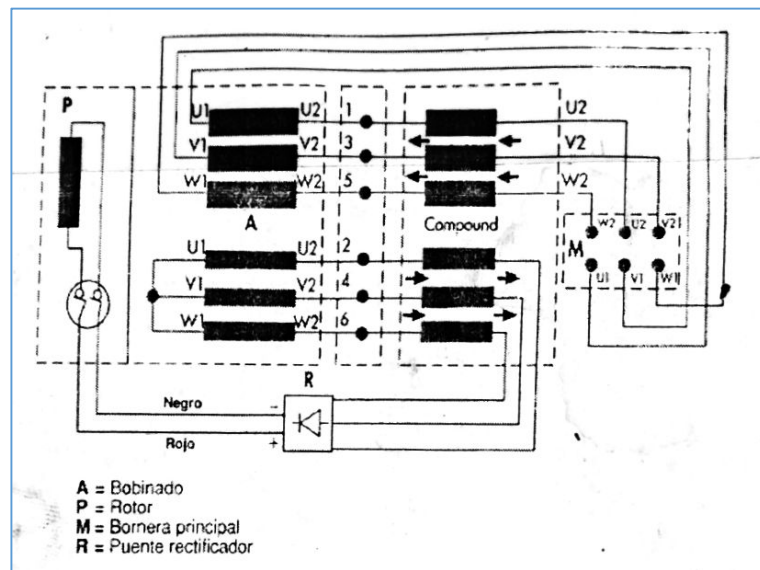


Fig. 59: Esquema eléctrico del sistema (AVR), de los alternadores HONDA. Fuente: HONDA

Sus características son:



Fig. 60: Grupo electrógeno  $\cos\phi=1$ , HONDA 6,4 kW-6,5 kVA (conjunto máquina térmica- alternador), comercial ECMT 6500 13.0. Fuente: Propia

Tabla 10 Grupo electrógeno HONDA comercial  $\cos\phi=1$ , 6,4 kW-6,5 kVA (conjunto máquina térmica- alternador).

GE HONDA ECMT 6500 13.0 (comercial)	M. Térmica GX 390 HONDA	Alternador
Potencia Nominal	6,4 Kw	6,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		10 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		30 A
$\cos\phi$		1
Par	26,5 Nm a 2500 rpm	
Peso	31,7 kg	
Inercia / $E_C$	0,002951 $\text{kgm}^2$ / 0,15 kW/s (calculada a partir de ensayos)	

### 7.2.2 Grupo electrógeno $\cos\phi=0,5$ , RAS 4,6 kW / 8,5 kVA

Es un grupo electrógeno diseñado especialmente, para poder mantener en permanencia unas cargas eléctricas con  $\cos\phi=0,5$ . En esta experimentación, se demuestra que es más adecuado para arrancar motores eléctricos de inducción.

Dispone de una máquina térmica de 4,6 kW, que lleva montado un alternador de 8,5 kVA, una talla superior al comercial de referencia de 6,5 kVA. El motor térmico es una talla más pequeña.

Todo ello para demostrar que el problema de las caídas de planta eléctrica por huecos de tensión, no es un problema de potencia activa, sino de falta de margen de regulación de reactiva y potencia instantánea suministrable por el alternador.

El control de tensión (AVR) es idéntico al HONDA comercial, por saturación de un transformador electromagnético, escondido en la caja de bornes del alternador.

Sus características son:



Fig. 61: Grupo electrógeno  $\cos\phi=0,5$ , HONDA 4,6 kW- 8,5 kVA (conjunto máquina térmica alternador), RAS. Fuente: Propia

Tabla 11 Grupo electrógeno  $\cos\phi=0,5$ , HONDA RAS especial 4,6 kW-8,5 kVA (conjunto máquina térmica-alternador).

GE "RAS" 9.0 (a medida)	M. Térmica GX 270 HONDA	Alternador Tekel TT 8,5
Potencia Nominal	4,6 Kw	8,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		12,3 A
$I_{CC}$ Cortocircuito		37 A
$\cos\phi$	0,5	
Par	19,1 Nm a 2500 rpm	
Peso	25,8 kg	
Inercia / $E_c$	0,003497 kgm <sup>2</sup> / 0,17 kW <sub>s</sub> (calculada a partir de ensayos)	

Los ensayos que se han realizado, demuestran que el sobredimensionado del alternador es la solución más adecuada, para evitar las caídas de planta de generación eléctrica.

### 7.2.3 Grupo de generación 15 kVA excitación manual

El alternador del GE Estribor 15 kW Excitatriz, dispone de la posibilidad de excitación manual y está autoalimentado.

Sus características son:

**Tabla 12 Grupo de generación 15 kVA  $\cos \phi = 1$  Estribor, con Excitatriz y AVR manual. Características y Grafico de arranque directo en vacío del motor Novat.**

GE Estribor Excitación Manual	M. Eléctrica	Alternador
		220 V
Potencia	15 Kw	15 kVA
rpm	1000	1000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		39 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		120 A
$\cos \phi$		1



Se observa una profunda y duradero hueco de tensión debido a la falta de sistema (AVR).

La caída de tensión alcanza el 82% y su duración es de 2.200 ms

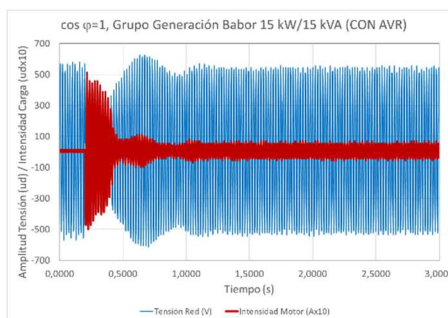
7.2.4 Grupo de generación 15 kVA con (AVR) electrónico autoalimentado

Dispone de (AVR) autoalimentado y realimentación por Tensión V.

Sus características son:

Tabla 13 Grupo de generación 15 kVA  $\cos \phi = 1$  Babor, con Excitatriz y AVR electrónico autoalimentado, Características y Grafico de arranque directo en vacío del motor Novat.

GE Babor Excitación AVR	M. Eléctrica	Alternador
		220/110 V
Potencia	15 Kw	15 kVA
rpm	1500	1500
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		39 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		120 A
$\cos \phi$		1



La actuación del sistema (AVR), atenúa la caída de tensión desde el 82% hasta el 53% y la duración de la misma desde 2.200 ms. a 394 ms. Obsérvese, además, el “overshooting” producido por la actuación del (AVR).

### 7.3 REPRODUCCIÓN EN EL LABORATORIO DE CADENAS PROPULSORAS PARA ENSAYAR

En la Fig. 59, se resume el conjunto de material utilizado.

El grupo electrógeno Honda comercial, representa a escala de laboratorio, la proporción entre motor térmico 6,4 kW y alternador 6,5 kVA, que suele montarse a bordo.

Pensado para alimentar en permanencia cargas resistivas, es decir  $\cos\phi=1$ . Es el más económico, pero carece del margen de control de energía reactiva, que precisan los motores de inducción en sus transitorios de arranque.

El motor Novat 4 kW “marca blanca”, arrancando en vacío, se ha usado para hacer caer el anterior grupo electrógeno Honda 6,4 kW/6,5 kVA, considerado la planta de referencia. El motor de 4 kW, aparentemente no debería hacerlo caer, pero provoca una caída de planta 2 de cada 10 arranques.

El grupo electrógeno RAS, representa la solución propuesta. Pues el mismo motor de inducción Novat 4 kW arranca perfectamente con este grupo electrógeno RAS, que dispone de margen para alimentar cargas inductivas permanentes hasta  $\cos\phi=0.5$ .

Se han ensayado otros motores de inducción, de ABB, considerada primera marca.

Los alternadores del laboratorio de 15 kVA, babor y estribor, se han usado para comparar tipos de respuesta e influencia de los reguladores de tensión (AVR).

El sistema (ACEE) ilustra su influencia sobre las diferentes problemáticas reproducidas en el laboratorio.

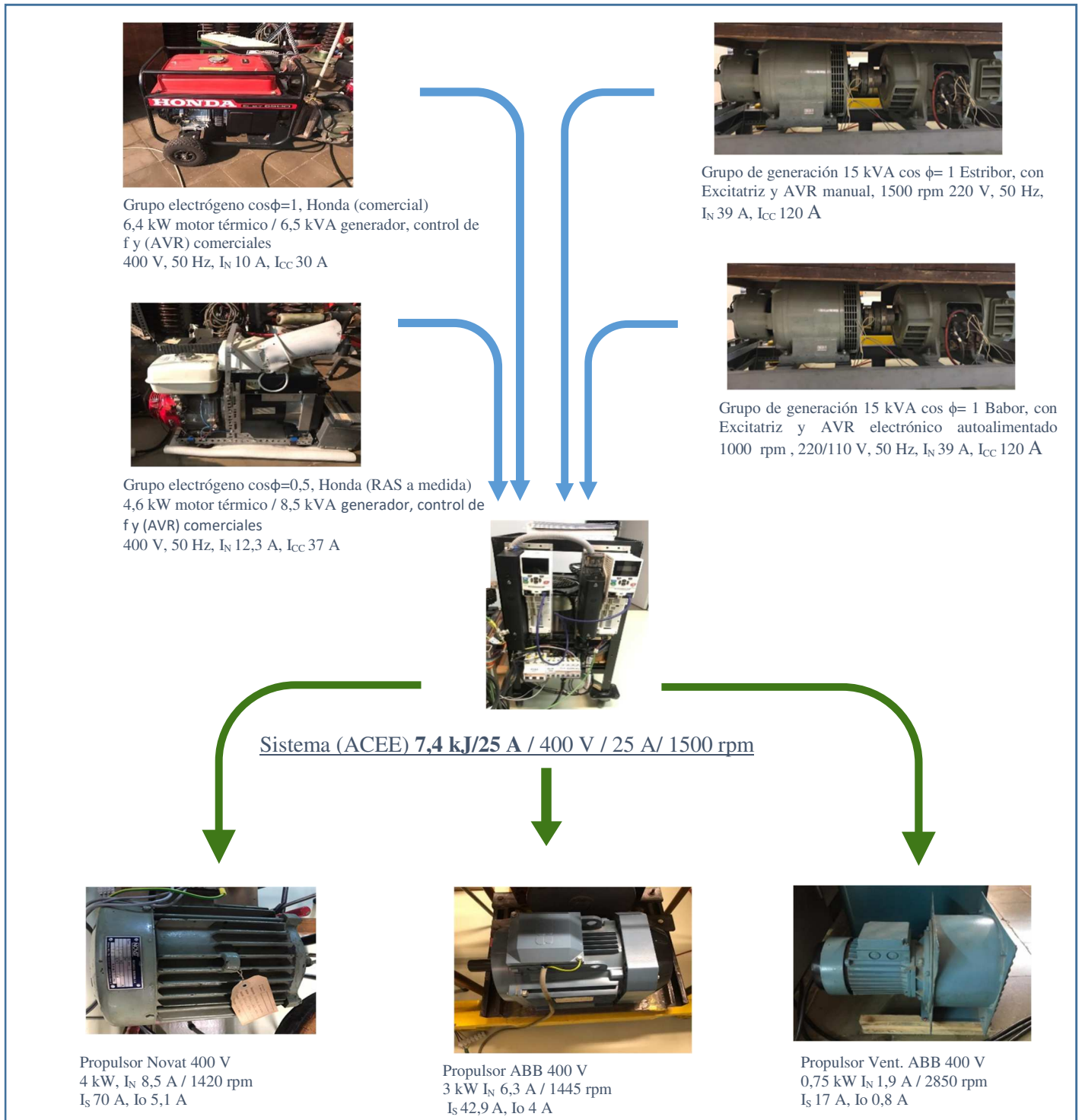


Fig. 62: Grupos Electrógenos y Motores Eléctricos de inducción, utilizados en esta Tesis. Fuente: Propia



### **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Se analiza solamente el transitorio de arranque directo en vacío, de varios motores de inducción del orden de 4 kW de potencia, por facilidad de experimentación y por ser la propulsión de la embarcación experimental de referencia “LADY”. Ver Anexo 7.

Se considera un transitorio severo y representativo de las condiciones de operación más duras a bordo. Las corrientes involucradas son de la misma magnitud, que las de operación en carga y solo se acortan un poco los tiempos de estabilización de las magnitudes eléctricas, que en carga son algo superiores.



#### 7.4 PROTOTIPO DE ACUMULADOR CINÉTICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ACEE) 7,4 kJ/25 A

Denominamos acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE), a un sistema regenerativo, compuesto de un motor eléctrico asociado a un volante de inercia, con los adecuados sistemas de regulación electrónica, control, protección y medida.

Se trata de construir un sistema controlado, que pueda acumular energía cinética y devolverla en forma de energía eléctrica a la red, en el momento que se requiera, tanto de forma manual como automática, basado en programas de control lógico programable (Plc),

Se ha centrado el ensayo, en el arranque directo en vacío de un motor o grupo de motores de inducción, de los citados en el apartado 6.1. Se consideran de alto consumo de corriente, en relación a la corriente nominal del alternador que los alimenta, para provocar profundos huecos de tensión y frecuencia. En nuestro estudio suelen tener, aproximadamente, la mitad de potencia del motor térmico.

El sistema (ACEE) construido 7,4 kJ/25 A, se conecta eléctricamente a los grupos electrógenos citados en el apartado 6.1, para mejorar las prestaciones del alternador implicado en cada ensayo, descargando controladamente la energía acumulada en el sistema acumulador, mediante un frenado regenerativo de su volante.

La aplicación del sistema (ACEE), está pensada para complementar construcciones ya existentes con problemas de huecos de tensión V, y posibles problemas de espacio. Simplifica la homologación por la Sociedad de Clasificación y por las autoridades de Marina. Se evita el desmontaje y cambio a un grupo electrógeno de mayor potencia eléctrica del alternador.

Este sistema se ha construido, con un enfoque principalmente práctico, de fácil funcionamiento, operación, flexible y programable. Puede montarse en cualquier lugar a bordo, mientras disponga de una conexión eléctrica de baja impedancia, con la planta que se pretende reforzar.

7.4.1 Prototipo de (ACEE) 7,4 kJ/25 A. Esquemas y Componentes Eléctricos

El esquema de principio de funcionamiento de un sistema regenerativo, es el que se muestra en la figura 64. Consiste en un sistema de 12 pulsos, con dos convertidores de frecuencia (VSD), unidos por el Bus CC de corriente continua. En este caso son equipos comerciales trabajando en 2 cuadrantes de la serie Unidrive M701, de la firma “Control Techniques” (Nidec), (‘Control Techniques’, no date)



Fig. 63 Convertidor de Frecuencia (VSD) de la serie Unidrive. Fuente: Propia

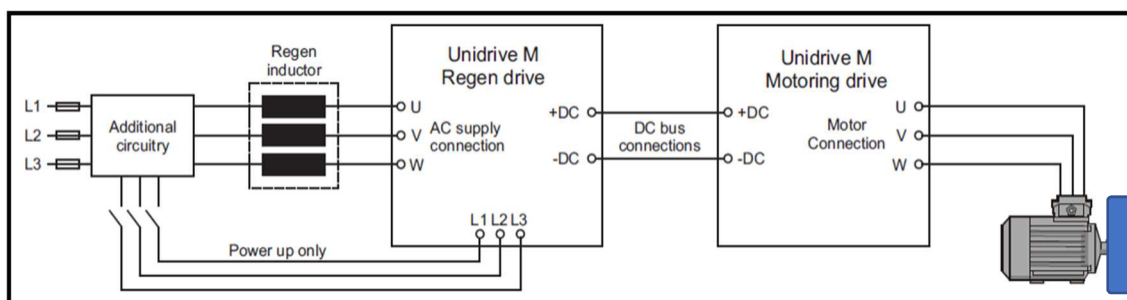


Fig. 64: Diagrama de bloques de un Sistema Regenerativo con volante de inercia. Fuente: “Control Techniques” y Propia.

Los convertidores de frecuencia (VSD) del sistema (ACEE), son idénticos en hardware, pero por software, pueden ser configurados para modos de trabajo distintos: Lazo abierto y cerrado para motor de inducción, lazo cerrado para motor síncrono, y finalmente sistema regenerativo, que es este caso.

El (VSD) “Regen” (lado izquierdo), estando alimentado de la red trifásica a 400 V, alimenta al (VSD) “Motoring” (lado derecho), mediante corriente continua rectificada, a la que se denomina “Bus DC”, que para 400V (CA) de alimentación, es de 600V (DC).

Este (VSD) “Motoring”, ondula la corriente continua y alimenta en corriente alterna trifásica, al motor que lleva el volante de inercia y que será la fuente de acumulación de energía cinética.

El sistema funciona descargando esta energía, mediante un frenado activo controlado, desde el propio (VSD) “Motoring”. Cuando la tensión, excede del umbral de 600 V, (DC), retorna corriente en la otra dirección, a través del transistor IGBT al Bus DC del (VSD) “Regen” y éste ondula, sincroniza con la red (función Scan), y devuelve este exceso de energía a la red de alimentación alterna.

La alimentación de potencia a través de L1, L2 y L3 del (VSD) “Regen”, solo se realiza durante la puesta en marcha del sistema; una vez alimentados (condensadores cargados) los dos (VSD) “Regen” y “Motoring”, se conmuta mediante maniobra de contactores, a la alimentación de entrada principal U, V, W.

Normalmente la etapa de entrada de un convertidor de frecuencia de corriente alterna (CA), no regenerativo, suele ser un rectificador a diodos no controlado y en consecuencia la energía no se puede devolver a la red de alimentación. Si reemplazamos el rectificador de entrada a diodos, por una fuente conmutada (PWM), como tiene el convertidor de frecuencia de la serie Unidrive M701, el flujo de alimentación de (AC) puede ser bidireccional, con control total sobre la forma de onda y el factor de potencia de la corriente.

Otra gran ventaja de este sistema regenerativo, es el bajo nivel de armónicos generados. En el caso del Unidrive M701 operando en modo regenerativo, la etapa de potencia (IGBT) se utiliza como un rectificador sinusoidal, convirtiendo la alimentación de entrada (AC), en una tensión de corriente continua (DC) controlada.

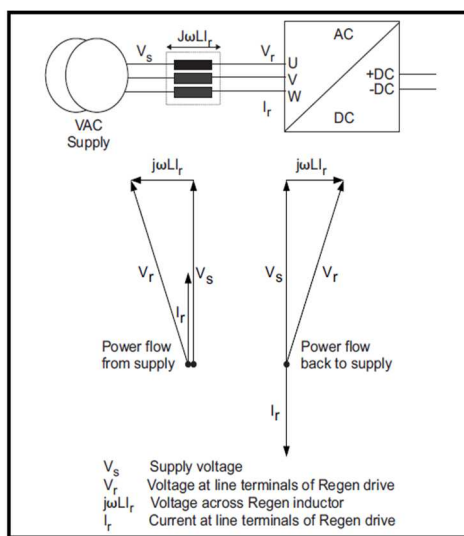


Fig. 65: Diagrama de Fasores V e I, sistema regenerativo. Fuente: "Control Techniques"

La tensión senoidal generada en el equipo "Regen", tiene componentes de alta frecuencia, debidas al sistema de modulación (PWM), que son filtradas mediante la inductancia "Regen", dando como resultado una corriente sinusoidal, sintonizada a la frecuencia de línea, con muy poco rizado de alta frecuencia.

La Fig. 65, muestra el diagrama de fasores de tensión y corriente, donde se puede ver la relación entre la tensión de alimentación y la regenerativa. El ángulo entre estos dos fasores es aproximadamente de 5° a plena carga.

Esta es la razón por la que el factor de potencia esté cercano a la unidad, exactamente es de 0.996, aunque depende de las condiciones de la fuente de alimentación.

Los dos Convertidores de Frecuencia "Unidrive" M701 de 11kW talla 5, modelo 05400270, han sido configurados en ciclo de trabajo duro, para poder alcanzar >150% del par nominal, siendo su corriente nominal, la más baja de las que figuran en la Tabla 15, correspondiente a la columna "Heavy Duty", es decir 25 A:

Tabla 14 Datos Técnicos de los Convertidores de Frecuencia utilizados, 05400270,

ciclo duro.

Model	Normal Duty				Heavy Duty			
	Max cont current	Nominal power at 400 V	Motor power at 460 V	Peak current	Max cont current	Peak current	Nominal power at 400 V	Motor power at 460 V
	A	kW	hp	A	A	A	kW	hp
03400078	9.5	4	5.0	11.4	7.8	15.6	3	5
03400100	12	5.5	7.5	13.5	9.5	16.6	4	5
04400150	16	7.5	10	20.3	15	28	5.5	10
04400172	24	11	15	26.4	16	28	7.5	10
05400270	30	15	20	33	25	43.7	11	20
05400300	31	15	20	34.1	30	60	15	20
06400350	38	18.5	25	41.8	34	60	15	25
06400420	46	22	30	52.8	40	70	18.5	30
06400470	60	30	40	69.3	46	80.5	22	30
07400660	70	37	60	86.9	66	122.5	30	50
07400770	94	45	60	103.4	70	122.5	37	60
07401000	112	55	75	123.2	96	168	45	75
08401340	155	75	100	170.5	124	217	55	100
08401570	180	90	150	202.4	156	273	75	125
09402000*	200	110	150	243.1	180	315	90	150
09402240*	255	132	200	280.5	200	353.5	110	150
10402700*	300	160	250	352	270	472.5	132	200
10403200*	350	200	300	397.1	300	525	160	250
11403770*	437	225	350	481	377	660	185	300
11404170*	460	250	400	506	415	726.2	200	350
11404640*	460	280	450	506	415	726.2	250	400

Se ha configurado a uno de los (VSD) como regenerativo “*Regen*”. Es el que, sincronizado con la red, devuelve la energía acumulada. El otro como “*Motoring*”, que es el que gobierna y controla al motor de inducción, que porta el volante de inercia, tanto en aceleración como en el frenado regenerativo.

En el presente trabajo, solo se ha hecho girar el motor del sistema (ACEE) en un solo sentido, como motor.

Las inductancias, condensadores y varistores recomendados por el fabricante, de tamaño y peso considerables, han sido instaladas en el mismo bastidor del sistema acumulador. Sus valores se muestran a continuación:

- “*Regen Inductor*” (L2), ref 4401-0408, 2400 mH, 25 A, 50/60 Hz, 3ph, 15 kg, IP00, es una inductancia activa, para mejorar la modulación de la forma senoidal, de la tensión que devolvemos a la red.
- “*SFF Inductor*” (L1), ref 4401-0165, 1200 mH, 25 A, 50/60 Hz, 3ph, 8 kg, IP00, es la inductancia que atenúa los armónicos y las radiaciones electromagnéticas, actuando sobre la fuente conmutada PWM.
- “*SFF Capacitor*” (A+B), ref 1610-8104, 10  $\mu$ F, 15 A, 50/60 Hz, IP00, 1,4 kVAr, se utiliza para disponer de potencia reactiva y para filtrar la fuente conmutada del (VSD) “*Regen*”

Varistores de protección, por sobretensiones para 400 V:

- 3 unidades ref 2482-3291

- 3 unidades ref 2482-3211

Tabla 15 Varistores de protección.

Drive rating	Voltage rating $V_{RMS}$	Energy rating J	Quantity per system	Configuration	Part number
200 V (200 V to 240 V $\pm 10$ %)	550	620	3	Line to line	2482-3291
	680	760		Line to ground	2482-3211
400 V (380 V to 480 V $\pm 10$ %)	550	620		Line to line	2482-3291
	680	760		Line to ground	2482-3211
500 V (500 V to 575 V $\pm 10$ %)	680	760		Line to line	
	1000	1200		Line to ground	
690 V (500 V to 690 V $\pm 10$ %)	385	550	6	2 in series line to line	2482-3262
	1000	1200	3	Line to ground	2482-3218

Para el esquema eléctrico del sistema acumulador, se han seguido estrictamente las recomendaciones y la distribución, definidas por el fabricante “Control Techniques” (Nidec), para un THD de armónicos del 8% Fig. 66, 67, 68 y 69.

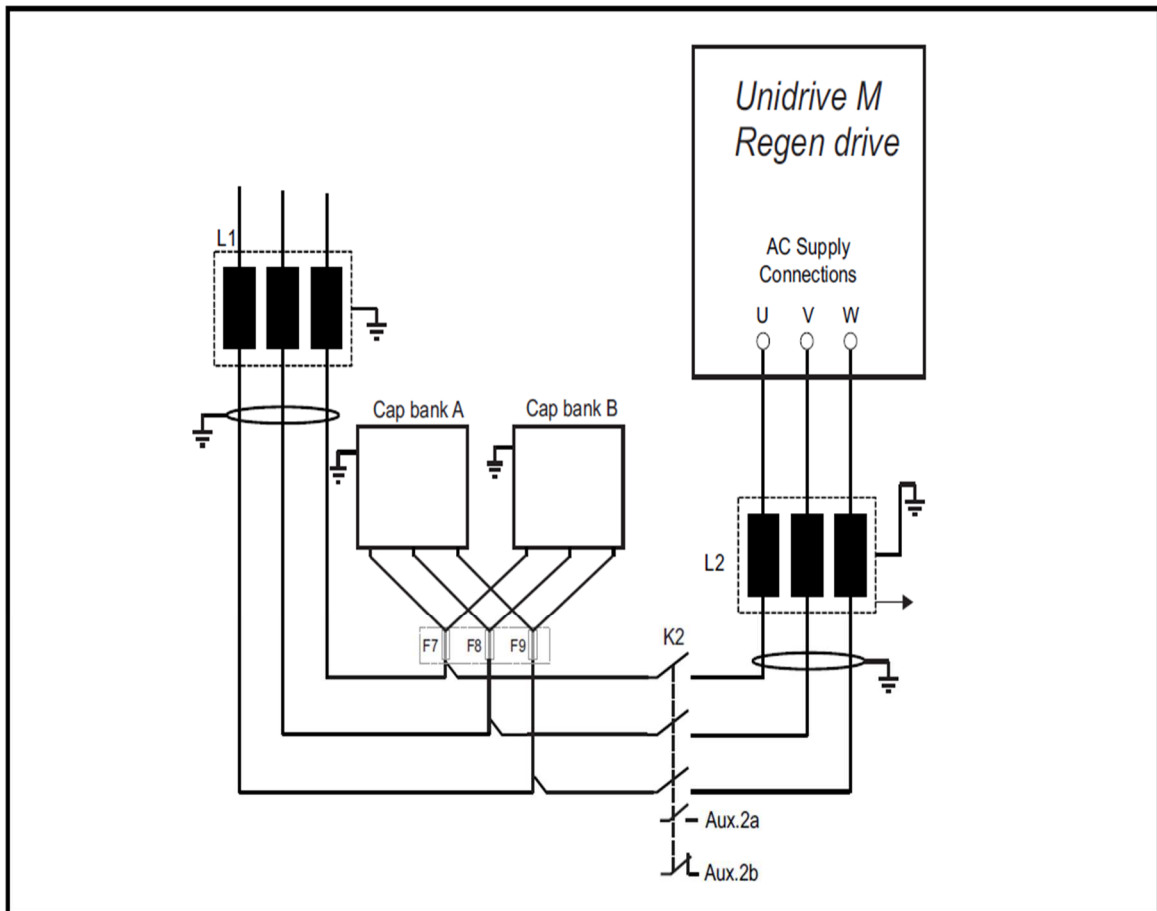


Fig. 66: Pack Condensadores del sistema Regenerativo. Fuente: “Control Techniques”

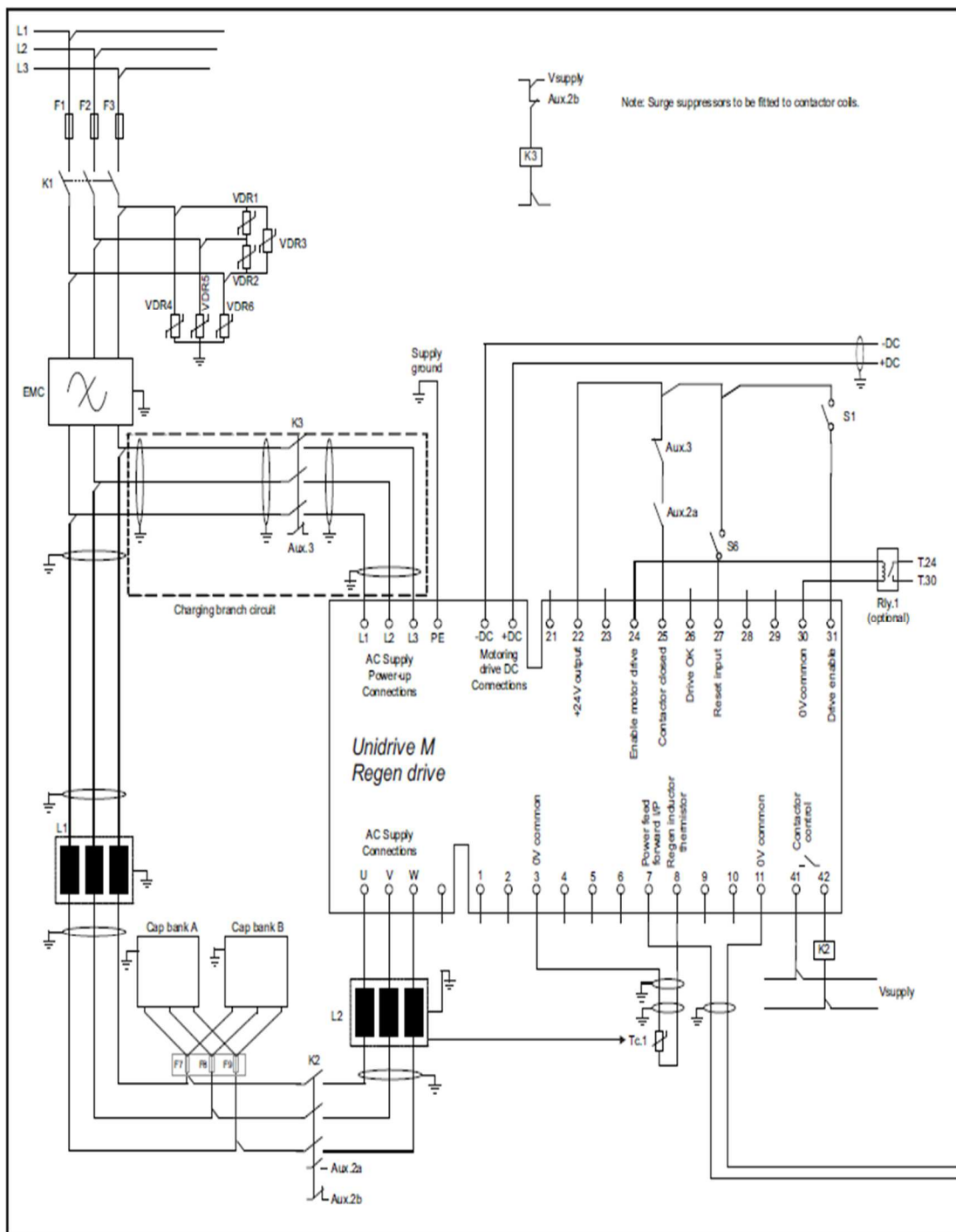


Fig. 67: Esquema Eléctrico de Potencia del (VSD) "Regen". Fuente: "Control Techniques"

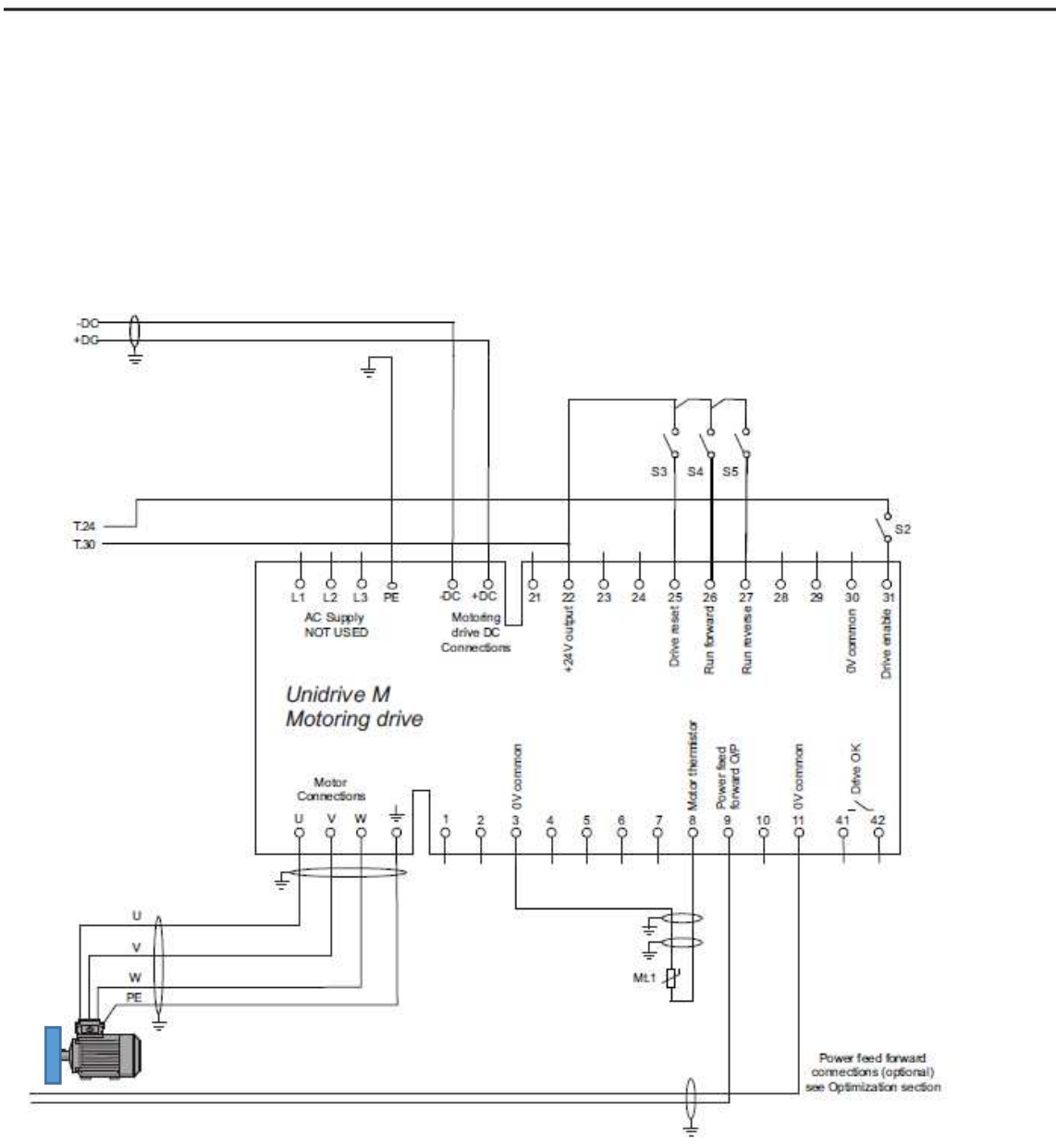


Fig. 68: Esquema Eléctrico de potencia del (VSD) “Motoring” con el volante de inercia del sistema (ACEE). Fuente: “Control Techniques”



**Estrategia experimental desarrollada en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB-UPC)**

Las protecciones, contactores e interruptores de maniobra del sistema acumulador, figuran en el Anexo 3.

La aparatmentada utilizada para la maniobra y las protecciones ha sido:

- Contactor Principal “Merlin Guerin” modelo C100 de 30 A tipo U y 40° C temperatura ambiente de trabajo. 380 V-10 KA IEC 1571 P1 / 415 V-8 KA IEC 1571 P1
- Contactores de Maniobra “Chint” modelo NC1-4011, 110 V 50/60 Hz Std IEC 60947-4-1
- Transformador de maniobra “Mimaven”, modelo T 40-E IP00 380 V / 110 V, 400 W

La frecuencia de conmutación elegida, ha sido la de 8 kHz, que es la más baja disponible y con menor ruido audible.

La ventilación, refrigeración, tanto del motor como de los (VSD) electrónicos, está asegurada por el ventilador del motor de 9 kW, que solo acciona el volante de inercia.

Se ha canalizado su flujo de aire con un deflector, dispuesto a medida entre la aparatmentada, para evitar cortocircuitos térmicos.

La construcción tiene un grado de protección IP00, en cuanto a cuadro eléctrico y de IP20 para los (VSD).

Los terminales de maniobra, están conectados tal como muestra el esquema siguiente:

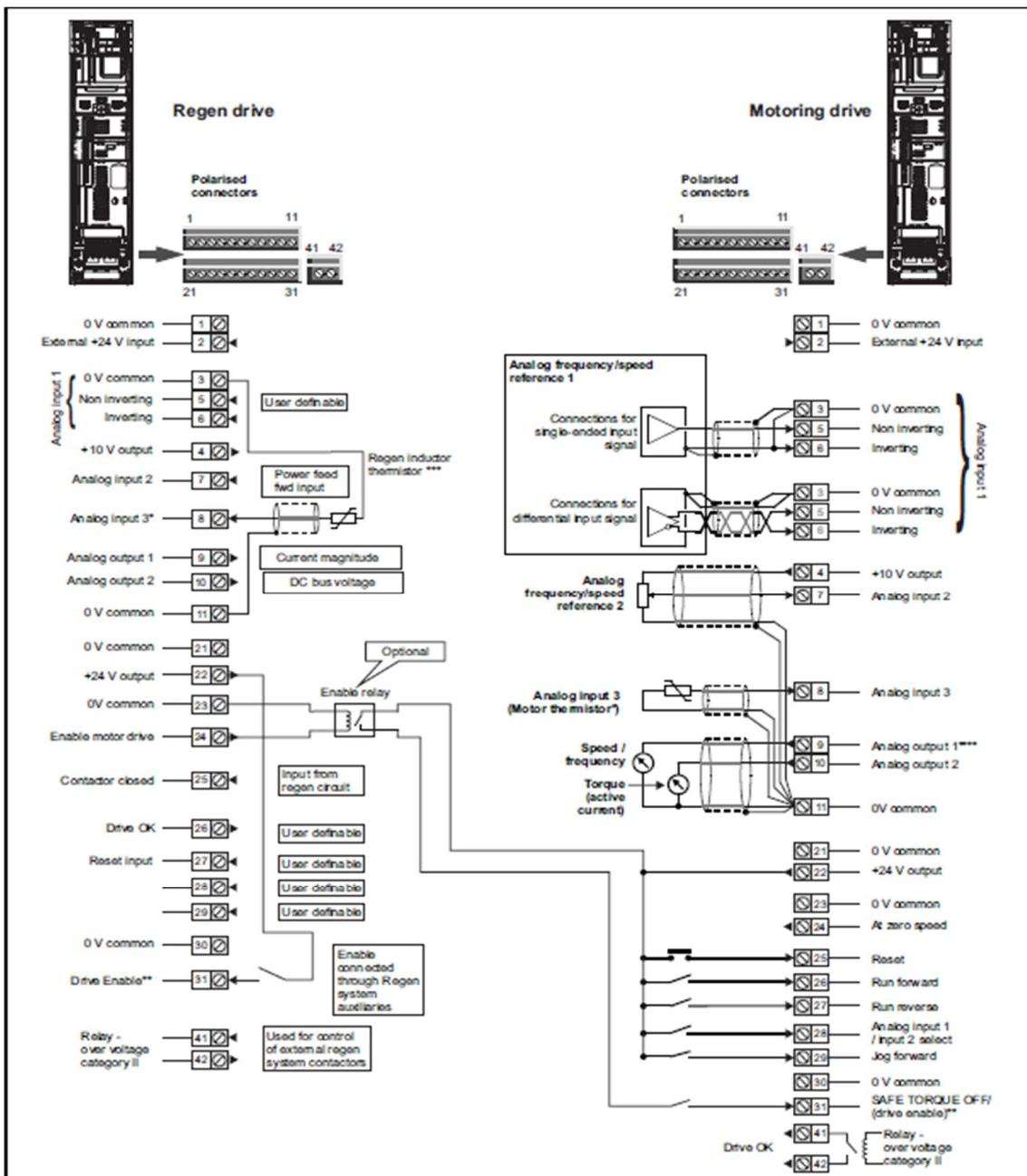


Fig. 69: Terminales de Maniobra del sistema Regenerativo. Fuente: “Control Techniques”

Ventajas de este sistema regenerativo:(Ribeiro, Steurer and Islam, 2004)

- Ahorro de Energía.
- La forma de la corriente de entrada es sinusoidal.
- El factor de potencia de la corriente de entrada, está muy cercano a la unidad. (0.996)
- Reducción de armónicos, <8%.
- Se puede controlar la corriente, potencia activa (kW) y la potencia reactiva (kVAr).
- Es posible configurar la unidad, para que continúe funcionando, aunque por poco tiempo, en caídas de suministro.
- Los límites de tensión y frecuencia pueden ajustarse.

7.4.2 Especificación electromecánica y descripción del prototipo (ACEE)  
7,4 kJ/25 A

7.4.2.1 Construcción y montaje del conjunto

Es un sistema monobloc y móvil.

Se ancló el conjunto a un soporte fijo, de generosa masa fijada al suelo, para evitar la rotación en caso de bloqueo accidental, del volante de inercia.

La bancada, tal como se observa en la Fig. 70 (izquierda), está formada por un chasis de acero de medidas 800 x 450 x 450 mm, construido a medida a partir de perfil en L 40 x 40 x 4 mm, electro soldado, con placa base de apoyo del motor, de acero, de 5 mm espesor. Dispone ruedas de altura 140 mm, para su fácil traslado.

El motor de 9 kW Fig. 70 (foto del centro), está fijado por 4 tornillos de M12, colocados a 90°, paso 1.75 mm. Traspasan 5 mm de la placa base y otros 21 mm del espesor de la brida. El diámetro medio del motor de inducción es 230 mm y su altura 410 mm



Fig. 70: Estructura metálica de la bancada, Presentación del Motor y Conjunto acabado. Fuente: Propia

Este motor de inducción de 9 kW, tiene acoplado a su eje de salida, con chaveta normalizada, un volante de inercia de 40 kg. Girando a velocidad nominal, es capaz de almacenar 7,4 kJ.

Está asociado a reguladores digitales electrónicos regenerativos (VSD), formando un conjunto de 4 cuadrantes (4Q) de 11 kW/15 kW, siguiendo las recomendaciones del fabricante en el Manual “Uni M Regen design Guide Issue 4 (0478-0366-04), tal como se describe a continuación:

Las características nominales del motor de inducción son:

- Potencia nominal 9 kW, 50 Hz.
- Par nominal 60,6 Nm.
- Régimen de giro nominal :1.440 rpm.
- Tensión 400 V.
- Corriente 21 A.  $I_s$  (corriente de arranque) 150 A.
- Corriente en vacío  $I_0$  8,4 A
- $\cos\phi = 0,83$ .
- Rendimiento  $\eta$  0,88.
- Construcción: IEC 38.
- Servicio S1, IP55.
- Eje 38 mm.
- Peso rotor 21,4 Kg.
- Momento de Inercia propio 0,04 Kgm<sup>2</sup> (ficha técnica).
- Peso motor completo de 51,8 Kg.

**Las características de los convertidores de frecuencia, son:**

- Fabricante: “*Control Techniques*”.
- Serie: Unidrive
- Modelo: M701.
- Tensión de alimentación: 400 V, 50 Hz,  $\cos \phi$  0,99.
- Potencia en ciclo duro: 11 kW.
- Nivel de armónicos: 8% THD.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

En el proceso de acabado de la estructura de soporte, se desmontó el motor y con tan solo la estructura metálica, se procedió a realizar las diferentes soldaduras de los diversos soportes, para las inductancias, condensadores y apartamento. Finalizando la actuación con el proceso de pintura de protección.



Fig. 71: Presentación y Montaje del volante de inercia. Fuente: Propia

#### 7.4.2.2 Ficha técnica del sistema (ACEE) para ensayos:

##### Tensión de Alimentación del sistema (ACEE):

Alimentación Potencia: 400 VCA (Trifásico, 50 Hz)

Alimentación Maniobra: 110 VCA (Monofásico, 50Hz)

##### Dimensiones mecánicas:

Motor de inducción sujetado por brida, B3:

Diámetro 270 mm, Altura 410 mm, Eje de 38 mm.

Tornillos de fijación 4xM12.

**Volante de Inercia:** Cilindro de acero macizo, Fig. 72

Diámetro 330 mm.

Espesor 60 mm.

Inercia 0,565 Kgm<sup>2</sup>.

Inercia total, Motor y Volante de inercia 0,605 Kgm<sup>2</sup>, peso total: 98,5 Kg.



Fig. 73: Montaje del Conjunto. Fuente: Propia



Fig. 72: Volante de Inercia. Fuente: Propia

### 7.4.2.3 Energía almacenable

Una vez cableado y con todos los componentes eléctricos y electrónicos montados, conectados y numerados, se obtuvo el prototipo que se muestra en las Fig. 74 y 75.

Se incluye el cálculo de la energía almacenada en el volante:

Cálculo de la inercia (J) del volante, a partir de su masa de 41,5 Kg y radio de 165 mm:

$$J = \frac{1}{2} \times m \times r^2 = \frac{1}{2} \times 41,500 \times 0,165^2 = 0,565 \text{ kgm}^2$$

Ecuación ( 43 ) Cálculo de la Inercia del Volante de Inercia.

$$\omega = 1500 \text{ rpm} \times \frac{2 \times \pi}{60} = 157 \text{ rad/s}$$

Ecuación ( 44 ) Velocidad angular de sincronismo en Rad/s.

m: masa volante de inercia.

r: radio del volante de inercia.

$\omega$ : velocidad angular del volante de inercia.

Sumaremos a la inercia del volante, la propia inercia del rotor del motor de inducción, que según el fabricante es 0,04 kgm<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} E_{c \ 1500} &= \frac{1}{2} \times J \times \omega^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0,565 \text{ Kgm}^2 \\ &\quad \times 157 \frac{\text{rad}^2}{\text{s}} \\ &= 7456 \text{ J} \sim \mathbf{7,4 \text{ kW} \times \text{s}} \end{aligned}$$

Ecuación ( 45 ) Energía acumulada a 1500 rpm.

$E_{c \ 1500}$ : energía cinética del volante de inercia girando a 1.500 rpm

Energía acumulada en el volante de inercia a **1.500 rpm = 7,4 kJ**



#### 7.4.2.4 Alerta de seguridad y Dimensiones principales

**Alerta de Seguridad:** No debe conectarse eléctricamente este dispositivo con las ruedas de transporte descritas en las fotos, que deberán ser desmontadas para los ensayos o anclarse de forma segura.

##### **Soporte y Bancada:**

Acero, de medidas: 800 x 450 x 450 mm.

Construido a partir de perfil de hierro en L, 40 x 40 x4 mm soldado.

Ruedas: Altura 140 mm.

Placa Base: Acero de 5 mm.

##### **Pesos medidos con dinamómetro:**

Volante: 41,5 kg.

Motor: 57 kg.

Soporte y Bancada. 38 kg.

Aparamenta eléctrica: 58 Kg. calculado por diferencia.

**Peso Total (ACEE) 194,5 kg.**

##### **Momentos de Inercia J:**

Motor: 0,04 kgm<sup>2</sup>.

Volante. 0,565 kgm<sup>2</sup>.

Conjunto Motor+Volante 0,6 Kgm<sup>2</sup>.

**Velocidad nominal:** 1.500 rpm.

**Corriente de Arranque directo (Max. Transitoria) 150 A.**

**Esquemas de maniobra eléctrica:** Ver Anexo 3

La disposición física de los elementos del (ACEE) se muestra en Fig. 74 y 75.



Fig. 74: Detalles Constructivos Sistema (ACEE), vista frontal. Fuente: Propia

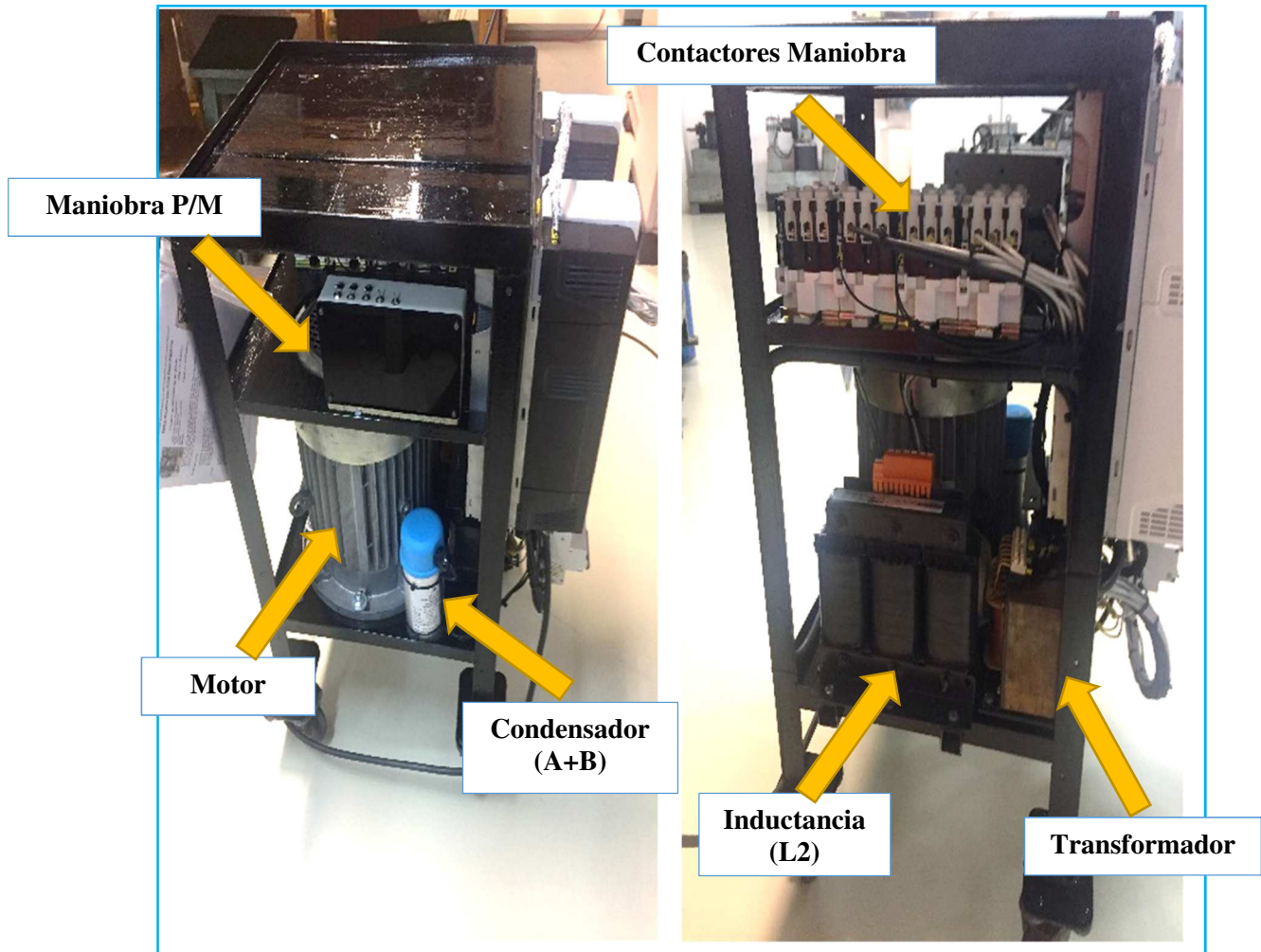


Fig. 75: Detalles Constructivos Sistema (ACEE), vista lateral y posterior. Fuente: Propia

#### 7.4.2.5 Funcionalidad esperada

Este prototipo deberá ser monobloc, robusto, con cableado protegido y fácil de transportar a instalaciones de pruebas, que requieran de suministro adicional de energía, para mantener tensión y frecuencia de red.

Se pretende poder ensayar a bordo, de algún barco Diesel-Eléctrico, que presente huecos de tensión durante su operación.

Debe poder amortiguar el hueco de tensión o caída de tensión  $V$ , del alternador HONDA comercial, frente al arranque directo de un motor de potencia mitad que la del generador, que hace caer su tensión más de un 60%.

El sistema acumulador, deberá ser también de fácil operatividad, se centra el estudio en la descarga de energía, para cubrir huecos de tensión. Se habilitan los modos de marcha de la descarga:

- De forma manual, mediante pulsador.
- De forma automática, utilizando el programa de Plc interno del convertidor de frecuencia Unidrive “*Plc on Board*”, detectando umbrales de diferentes variables como: tensión de red, corriente de carga, frecuencia de la red y tensión de Bus DC.
- Recuperación de la tensión de red. Es el objetivo que persigue el sistema (ACEE) y es la magnitud más fácil de medir.
- Incremento de corriente  $I$ : el arranque directo de un motor de inducción, consume entre 7 y 8 veces la corriente nominal, durante un transitorio de duración entre 100 ms y 1000 ms. dependiendo de la talla del motor. Suele ser la causa del hueco estudiado, debido a la falta de potencia instantánea del motor térmico.
- Variación de la frecuencia  $f$ : se han medido en el arranque directo de los motores de inducción de potencia significativa respecto la del alternador, caídas de frecuencia desde los 50 Hz hasta 33 Hz, más del 30%, e incluso en ocasiones, hasta los 30 Hz.
- Incremento de la tensión del Bus DC: cuando se conecta una carga (corriente eléctrica), al sistema (ACEE), éste automáticamente reacciona con un incremento del Bus DC, para compensar la caída de tensión, que el arranque del propulsor ha provocado.

Este control por umbrales prefijados, ha de poder complementarse con las actuaciones temporales anticipativas.

Se dispone de 7,4 kW de energía acumulada en el volante de inercia. La potencia nominal es de 9 kW y la de pico del orden de 60 kW. Durante un tiempo determinado y se podrán controlar las dos variables, potencia y tiempo, para descargar energía de la manera que la red lo requiera. Más potencia durante menos tiempo, o menos potencia con tiempo más prolongado.

**Estrategia experimental desarrollada en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB-UPC)**

Este perfil se ha visualizado en los registros de osciloscopio, como la curva V-t del Bus DC.

El sistema acumulador deberá estar alimentado por el grupo electrógeno a 400 V, 50 Hz.

Los elementos auxiliares a tensiones de 110 V, 50 Hz, vendrán de un transformador monofásico integrado en el conjunto (ACEE), que dispondrá de una sola conexión de potencia, con un conector CETACT de 4/5 conexiones y 16 A.

El sistema acumulador es de los denominados de baja velocidad, ya que gira en el entorno de 1500 rpm.

El peso del sistema acumulador, es una parte importante de la especificación, en este primer prototipo.

Se ha reciclado un volante de inercia de acero, procedente de proyectos anteriores.

La velocidad de rotación del volante de inercia, no superará 1.500 rpm, aunque resiste con seguridad 4.500 rpm.

Este volante se encontrará resguardado, dentro de la estructura, en un lugar que impida el contacto accidental.

La compatibilidad electromagnética (EMC), de radiaciones tanto conducidas, emitidas y radiadas, se ha procurado que estén dentro de los niveles marcados por la Directiva Europea 2014/30/UE, a nivel industrial y normas:

- *EN 61000-6-2:2005 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-2: Generic standards - Immunity for industrial environments.*
- *EN 61000-6-4: 2007+ A1:2011 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-4: Generic standards - Emission standard for industrial environments.*
- El nivel de armónicos, estará por debajo de lo que especifica la norma CEI 61000-3-4 o la EN 61000-3-4 para los aparatos de baja tensión, que absorben una corriente superior a 16 A, que será este caso. También es de aplicación la norma:
- *EN 61000-3-2:2014 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits for harmonic current emissions.*

El contenido de armónicos de baja frecuencia de la corriente de entrada a los (VSD) es bajo, THD del 8%, debido a la naturaleza sinusoidal de la forma de onda, en comparación con la de un puente rectificador convencional a diodos no controlado.

#### 7.4.2.6 Medidas de seguridad aplicadas

Resulta imprescindible un sistema de sujeción del acumulador que impida su desplazamiento. (Canadian Standards Association (CSA), 2009a, 2009b). Esto es debido a la energía cinética, que se acumulará en el volante de inercia de 41,5 kg (7,4 kJ a 1.500 rpm). Debe tenerse en cuenta el efecto giroscópico del conjunto y las acciones de frenado dinámico que se realizaran.

El sistema de fijación elegido, ha sido de eslingas amarradas sobre una estructura pesada.

Para asegurar que, en el caso de que el volante de inercia se pudiera aflojar y saliera despedido, se ha colocado una madera, que actúa como detector fusible, a una distancia de 8 mm por debajo del volante. Serviría como indicador acústico de que el volante, se hubiera desplazado de su posición original y así poder realizar un paro de emergencia controlado.

Eléctricamente, como se ha referido en títulos anteriores, todo el sistema acumulador está aislado galvánicamente, protegido con interruptores automáticos y controlado mediante contactores.

En cada arranque, debe respetarse el orden de conexión de los contactores, siguiendo el protocolo del fabricante “Control Techniques” en su manual “Regen Design Guide” Part Number: 0478-0366-04 Issue: 4”, cuyo resumen se detalla en la “Guía de Usuario” del Anexo 4.

Las protecciones y conexiones se han realizado, según el mismo manual referido. También se ha contemplado la seguridad de las personas del entorno.

#### 7.4.2.7 Instrumentos de medida utilizados

Se han utilizado principalmente los siguientes instrumentos de medida:

- Osciloscopio Digital marca Yokogawa modelo DL 1640 de frecuencia de muestreo hasta 200 Ms/s., 200 Mhz., 4 canales, color, impresora y con salida USB para grabar tanto las imágenes como los ficheros de datos en formato csv.
- Osciloscopio Digital incluido en el software “*Machine control estudio*” del fabricante “*Control Techniques*” rodando en PC, de 8 canales, color y con salida USB para grabar.
- “*Data Logger*” Digital incluido en el software “*CT Connect*” del fabricante “*Control Techniques*” rodando en PC, color, para recogida de variables y con salida USB para grabar.
- Pinza amperimétrica analógica marca Gossen, fondo de escala de 30/300/1000 A.
- Multi tester digital, marca Promax tipo CT195.
- Registrador de Frecuencias y Ruido de “*Physics Toolbox*”.
- Cámara Termográfica marca “*Flir Systems*”, modelo FLIR i5 (x1)



## 7.5 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN Y CONTROL

### 7.5.1.1 “CT Connect”. Parametrización

Con los (VSD), de la serie “Unidrive M”, el fabricante “Control Techniques”, para facilitar la programación de los equipos, suministra una licencia del software “CT Connect”, para la configuración rápida desde PC.

La versión que hemos utilizado es la V2.11.3:



Fig. 76: Versión de Software utilizada de “CT Connect”. Fuente: “Control Techniques”.

Las funciones disponibles, se observan en esta pantalla, que a continuación se presenta:

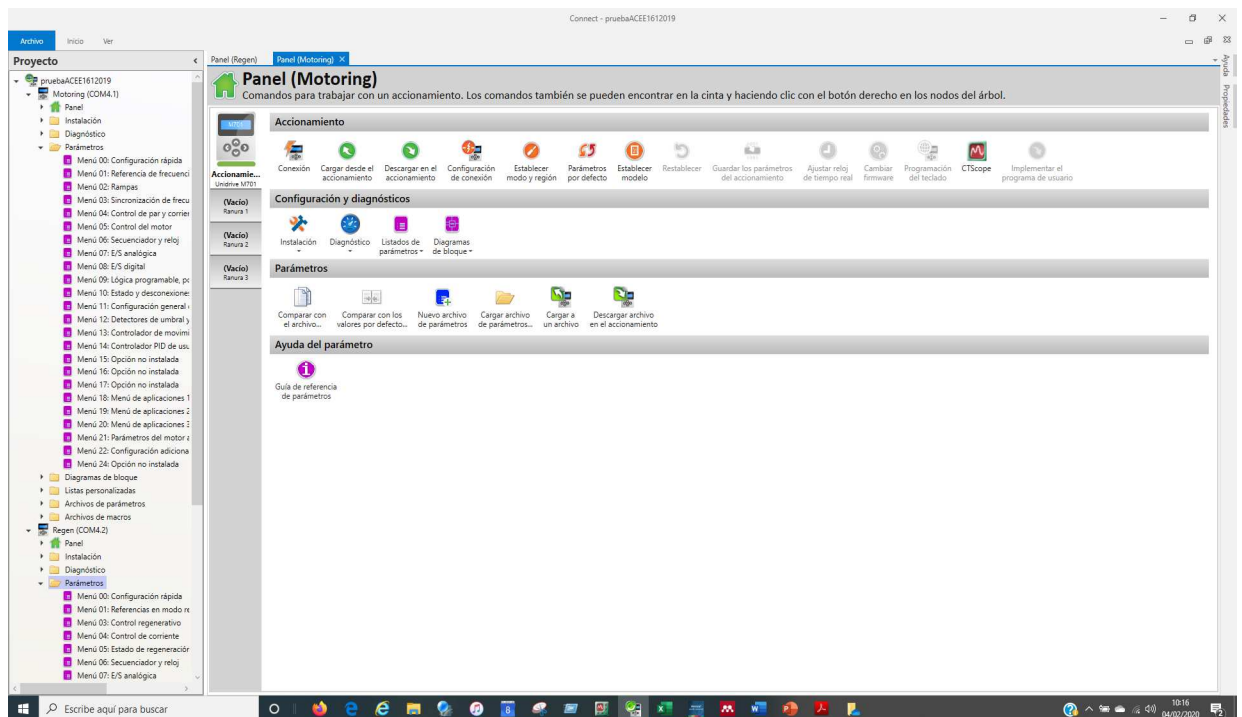


Fig. 77: Pantalla principal de Inicio de “CT Connect” Fuente: “Control Techniques”

Desde aquí, es posible configurar la comunicación a alta velocidad “RTU Modbus” con los (VSD). En este caso, se ha elegido la máxima velocidad, siguiendo la recomendación del fabricante (115.200 Baudios).



Estrategia experimental desarrollada en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB-UPC)

Mediante este software, se pueden gestionar, guardar y cargar los ficheros de parámetros en las dos direcciones, del (VSD) al PC y viceversa.

La función principal, es la de programar los parámetros, tanto del convertidor de frecuencia “*Motoring*” como del “*Regen*”.

Como se observa en la pantalla, hay 24 menús para cada uno, con un promedio de 50 parámetros por menú, resultando un total posible a programar, de aproximadamente 1.000 parámetros, por cada convertidor de frecuencia (VSD), sin embargo, con unos 98 parámetros, ha sido suficiente en esta primera etapa, gracias a la ayuda del menú 00, menú simplificado de configuración rápida.

Hay herramientas de ayuda, que explican cada parámetro, si es de lectura o escritura, sus valores, si son tarea de “*background*” o no y su tiempo de refresco entre otros; la ayuda aparece así:

<b>Parameter</b>	<b>05.005 D.c. Bus Voltage</b>		
Short description	Displays the voltage across the d.c. link of the drive		
Mode	Open-Loop		
Minimum	-VM_DC_VOLTAGE	Maximum	VM_DC_VOLTAGE
Default		Units	V
Type	16 Bit Volatile	Update Rate	Background read
Display Format	Standard	Decimal Places	0
Coding	RO, FI, VM, ND, NC, PT		

Fig. 78: Muestra de ayuda en "CT Connect" Fuente: "*Control Techniques*"

Los valores de refresco, van desde 250 µs para las tareas rápidas, hasta 10 ms para las de background.

Existe un menú de configuración rápida, el menú 00, para los (VSD) “*Regen*” y “*Motoring*”, que incluye los parámetros principales a ajustar para una configuración básica.

“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

Este menú tiene el siguiente aspecto:

Menú 00: Configuración rápida				
Ver los parámetros del accionamiento y los módulos de opciones.				
Comparar con los valores por defecto   Comparar con el archivo   Imprimir   Vista preliminar   Exportación a PDF   Columnas   Ver				
Buscar...				
Parámetro	Título	Categorías	Valor	Origen/destino
00.001	Bloqueo de referencia mínima		0,0 Hz	
00.002	Bloqueo de referencia máxima		50,0 Hz	
00.003	Velocidad de aceleración 1		30,0 s	
00.004	Velocidad de deceleración 1		7,0 s	
00.005	Selector de referencia		Teclado	
00.006	Límite de corriente simétrica		165,0 %	
00.007	Modo de control de bucle abierto		Ur S	
00.008	Aumento de tensión a baja frec		3,0 %	
00.009	Seleccionar T a F dinámica		<input type="checkbox"/> Desactivado	
00.010	Rpm del motor		1500 rpm	
00.011	Frecuencia de salida		50,0 Hz	
00.012	Magnitud de corriente		8,759 A	
00.013	Corriente generadora de par		0,600 A	
00.014	Selector de modo de par		1	
00.015	Modo de rampa		Rápido	
00.017	Destino de entrada digital 06	T29	6,031	Velocidad lenta
00.018	Detección falla termistor P1		Ninguno	
00.019	Modo de entrada analógica 2	T7	Volt	
00.020	Destino de entrada analógica 2	T7	1,037	Referencia analógica 2
00.021	Modo de entrada analógica 3	T8	Volt	
00.022	Activar referencia bipolar		<input type="checkbox"/> Desactivado	
00.023	Referencia de velocidad lenta		0,0 Hz	
00.024	Referencia prefijada 1		0,0 Hz	
00.025	Referencia prefijada 2		0,0 Hz	
00.026	Referencia prefijada 3		0,0 Hz	
00.027	Referencia prefijada 4		0,0 Hz	
00.028	Activar código auxiliar		Desactivado	
00.029	Archivo de tarjeta de medios NV cargado previamente		0	
00.030	Duplicación de parámetro		Ninguno	
00.031	Tensión nominal accionamiento		400V	
00.032	Pot nom máx con gran amperaje		27,000 A	
00.033	Detección de motor en giro A		Desactivar	
00.034	Código de seguridad de usuario		0	
00.035	Modo serie	Configura...	8 2 NP	
00.036	Velocidad en baudios serie	Configura...	115200	
00.037	Dirección serie	Configura...	1	
00.038	Ganancia Kp control corriente		54	
00.039	Ganancia Ki control corriente		40	
00.040	Autoajuste		Ninguno	
00.041	Frecuencia de conmutación máxima		8	

Fig. 79: Menú 00, "CT Connect". Fuente: "ControlTechniques"

Y finalmente, existe un menú de parámetros por defecto, que retorna el (VSD) a los parámetros originales de fábrica.

### 7.5.1.2 “CT Scope”. Registros oscilográficos

De la misma manera, el fabricante suministra una licencia de un programa simulador de osciloscopio, que se procesa en el propio PC, tiene 8 canales a color, configurables para registrar parámetros analógicos y digitales; en nuestro caso son todos analógicos.

El tiempo de “scan” es ajustable hasta un mínimo de 1 ms.

Se ha utilizado la versión V2.5.0.13



Fig. 80: Versión de Software “CT Scope”. Fuente: “Control Techniques”

Se registran valores máximos, lo cual para ajustes generales es muy práctico, aunque no llega a la precisión de un osciloscopio profesional.

Como ejemplo, se muestra un registro de dos canales (rpm y kW de regeneración), de un frenado regenerativo desde la velocidad nominal 1500 rpm hasta 1250 rpm.

El trazo verde representa rpm del motor.

El trazo azul representa kW consumidos y generados (zona negativa).

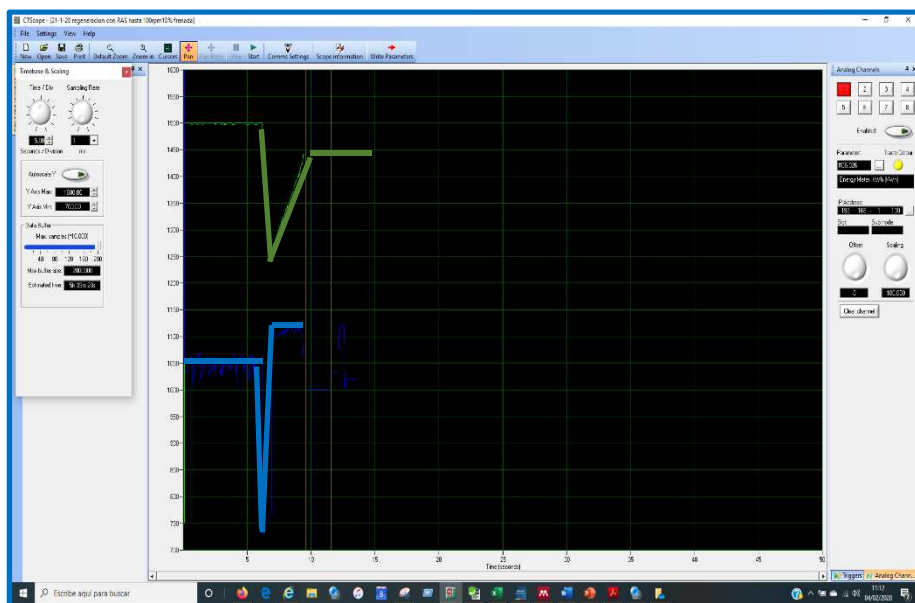


Fig. 81: Muestra de un registro de velocidad (verde) y potencia (azul) “CT Scope”. Fuente: “Control Techniques” y Propia

### 7.5.1.3 “MCS, Machine Control Studio”. Programación Plc

Los (VSD) de la serie Unidrive M que se han instalado, disponen de un espacio de memoria para programación de Plc, el denominado “*Plc on Board*”, son unas 100 líneas libres en un lenguaje similar al “*Ladder*” y programable mediante el software (SW), que es propio del fabricante, denominado: “*Machine Control Studio*”, MCS. Este software (SW), es una aplicación que rueda también en Windows PC. Se ha utilizado la versión V01.09.04



Fig. 82: Versión de “MCS”. Fuente: “*Control Techniques*”

Las tareas que se desarrollan en este programa de Plc, podemos resumirlas en:

#### ***Freewheeling***

Inicialización de variables.

Asignación de variables a parámetros del VSD.

#### ***Clock***

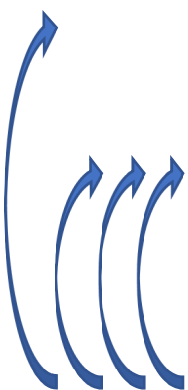
Lectura de variables.

Aceleración del volante.

Monitorización de la variable.

Proceso de regeneración.

Variable de escritura



Su aspecto es el siguiente:

```
1 PROGRAM Freewheeling
2 VAR
3   Ref_Par_4008 : LREAL;
4   Ref_Par_captura : LREAL;
5   Ref_Par_Offset : LREAL;
6   Delta_Par : LREAL;
7
8   DC_Bus_5005 : INT;
9
10  Set_Point_DC_Bus : INT;
11  Delta_DC_Bus : INT;
12  Activo_Descarga : BOOL;
13 END_VAR
14
15 //Aquest programa es només una base i donar idees
16 //S'han de tenir en compte limitis de treball
17 //Per servir el BUS DC per veure la caiguda de tensio de la red no esta molt clar
18 //Possiblement mirant la frecuencia de la xarxa principal es detectaria la sobrecarga correctament
19 //La lectura de frecuencia es podria llegir per una entrada analogica del M701
20
21 //Inicializaci3n
22 M04.P010_TorqueOffsetSelect := 1 ; //Activa Torque Offset
23
24 //Variables lectura
25 DC_Bus_5005 := M05.P005 ;
26 Ref_Par_4008 := M04.P008_TorqueReference ;
27
28 IF M18.P011 = 0 THEN M18.P011 := 700 ; END_IF
29 Set_Point_DC_Bus := M18.P011 ; //Punto de referencia DC Bus
30 M18.P012 := MIN(MAX(M18.P012,0),60) ; //Limites de introducci3n
31 Delta_DC_Bus := M18.P012 ; //Caída de BUS para detectar sobrecarga
32 Delta_Par := INT_TO_LREAL(M18.P013) /10.0 ; //Reducci3n de par en i para inyectar la Descarga Energía Cinética
33
34 //Monitorizaci3n DC BUS
35 IF DC_Bus_5005 < (Set_Point_DC_Bus - Delta_DC_Bus) AND Activo_Descarga = FALSE THEN
36   Activo_Descarga := TRUE ;
37   Ref_Par_captura := Ref_Par_4008;
38 ELSIF DC_Bus_5005 > (Set_Point_DC_Bus - 10) AND Activo_Descarga = TRUE THEN
39   Activo_Descarga := FALSE ;
40 END_IF
41
42 //Proceso de Descarga de Energía Cinética
43 IF Activo_Descarga = TRUE THEN
44   Ref_Par_Offset := Ref_Par_captura * Delta_Par / 100 ;
45 END_IF
```

Fig. 83: Muestra de “MCS”, Programa Freewheeling. Fuente: "Control Techniques"

Este SW, se estructura en las siguientes partes:

**“Fast Access Parameter List”**

Aquí se definen los parámetros de actualización rápida.

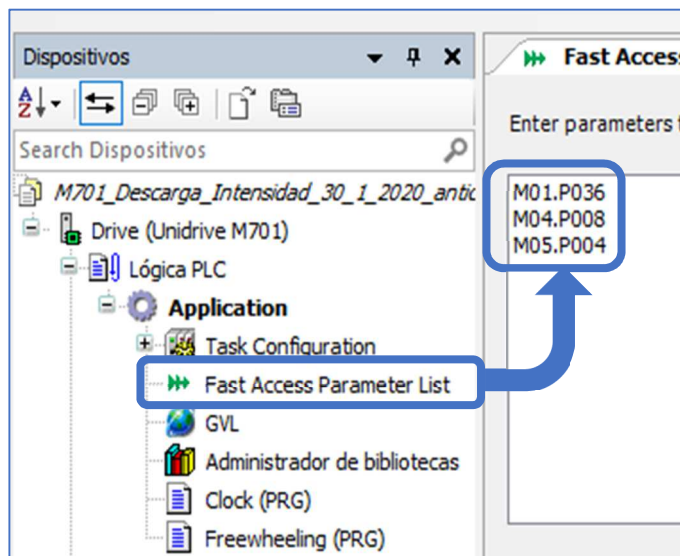


Fig. 84 Parámetros de actualización rápida. Fuente: Propia

La principal característica de estos parámetros, es que se actualizan cada 250  $\mu$ s.

En el caso de la Fig. 84, que se muestra arriba, los parámetros de actualización rápida son: M01.P036, M04.P008 y M05.P004. (número de menú seguido, del número de parámetro)

### “GVL” (*Global Variable List*)

Se definen las variables globales, utilizadas en las diferentes tareas del proyecto.

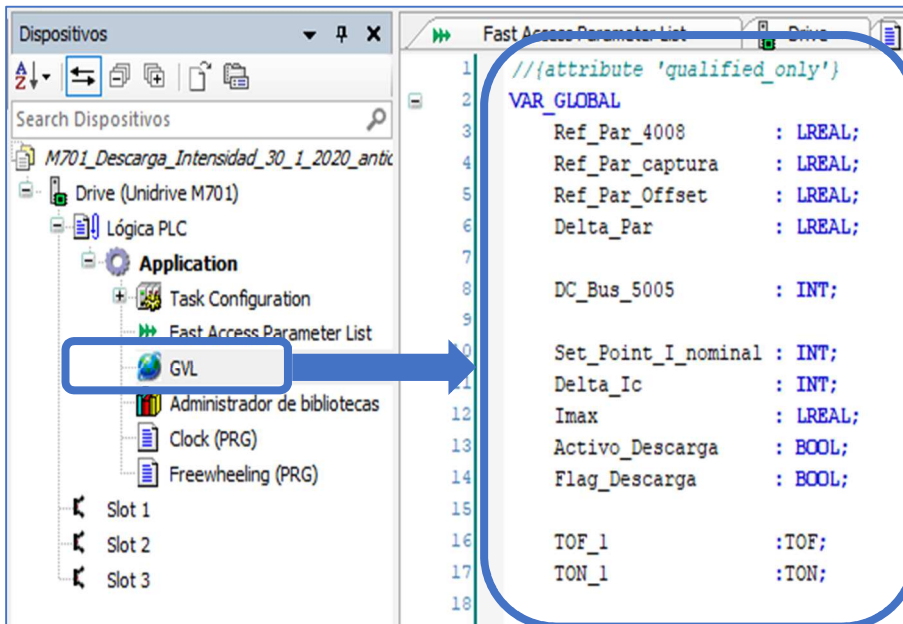


Fig. 85 Listado de Variables Globales. Fuente: "Control Techniques"

En la Fig. 85, se puede ver el listado de las variables utilizadas y su tipo correspondiente.



### “Clock”

Código de programa prioritario, que se ejecuta de forma cíclica, en un intervalo de tiempo predefinido de 4 ms., por encima de las demás tareas del programa.

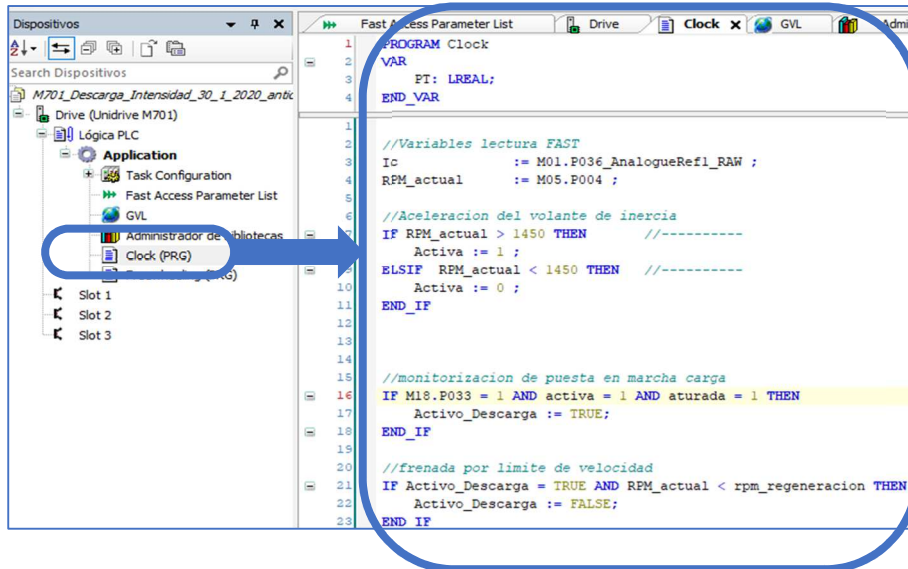


Fig. 86 Pantalla del Programa Clock. Fuente: "Control Techniques"

### “Freewheeling”

Código principal del programa, que se ejecuta de forma secuencial, teniendo prioridad el código “Clock”.

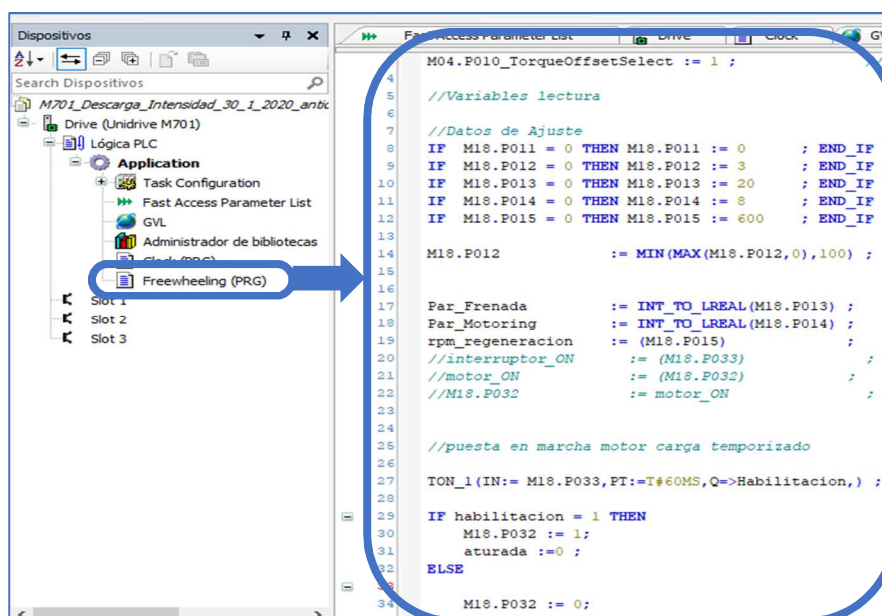


Fig. 87 Pantalla del Programa Freewheeling. Fuente: "Control Techniques"

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Como finalidad el” MCS”, edita el programa, verifica la sintaxis, compila, graba y descarga en el (VSD) en el área del Plc interno, siendo residente en el mismo y no requiriendo para su ejecución conexión alguna con el PC.



## 8 MEDICIONES EXPERIMENTALES

### 8.1 ENSAYOS PREVIOS REALIZADOS DE LOS COMPONENTES

Antes de iniciar los ensayos, se realizó una comprobación exhaustiva de los componentes del sistema eléctrico y mecánico, en especial de:

1. Comprobación de los diferentes sistemas seguridad.
2. Fijación mecánica del conjunto (ACEE) a los lastres de seguridad.
3. Fijación mecánica del volante de inercia al eje y soportes motor.
4. Habilitación, des habilitación y reseteado correcto de los (VSD), desde el panel de maniobra, construido exprefeso para ello.
5. Conexionado y maniobra del motor de Inducción. (Propulsor)
6. Conexionado y maniobra de los convertidores de frecuencia (VSD).
7. Conexionado y maniobra de los contactores.

Se verifica la operatividad de forma segura de los diferentes sistemas, que permita registrar oscilograficamente las magnitudes eléctricas, durante los transitorios electromecánicos estudiados.

Para poder hacer lecturas correctas de tensión y corriente, en el osciloscopio digital de 4 canales marca Yokogawa modelo DL 1640 200 MHz, se construyó un panel de transductores y adaptadores de señal, donde se montaron las resistencias calibradas (Shunts), transformadores de tensión (TT) y transformadores de intensidad (TI), necesarios.

Se muestra en la Fig. 88 una imagen, con detalle de sus componentes. La primera configuración de los canales del osciloscopio, fue:

<b>(Tensión Red, C1)</b>	<b>(Intensidad Red, C2)</b>	<b>(Intensidad (ACEE), C3)</b>	<b>(Intensidad Carga, C4)</b>
10,8 V-235,6 V	60 mV-5/40 A	60 mV-5/40 A	60 mV-5/40 A
4,584 mV/V	1,5 mV/A	1,5 mV/A	1,5 mV/A

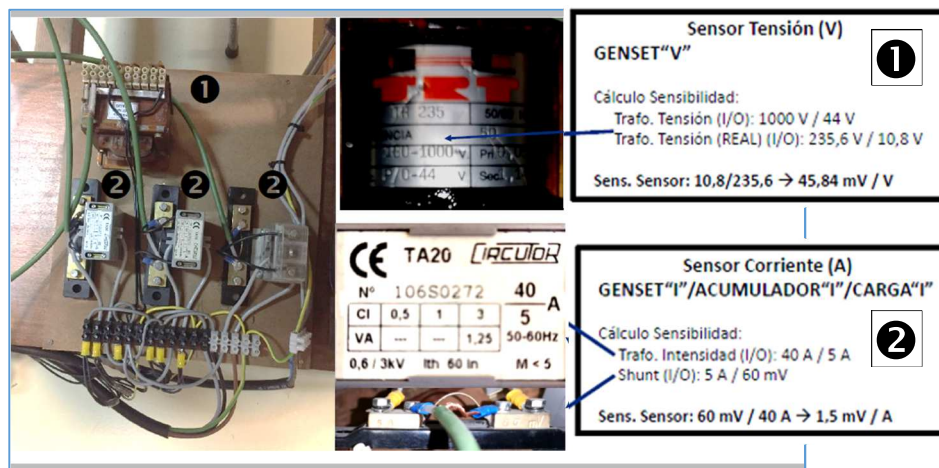


Fig. 88 Panel de Transductores, Shunts, Trafos Tensión e Intensidad. Fuente: Propia

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

Se pretenden realizar lecturas simultaneas de tensión e intensidad del alternador, y Bus DC del sistema (ACEE), así como su intensidad y la de la carga, que serán los parámetros eléctricos, que se verán más afectados, por el arranque directo de motores de inducción (Propulsores) y por la descarga de energía del sistema acumulador.

Esta cadena energética, ha ido adaptándose a los diferentes ensayos y magnitudes a medir, en las diferentes pruebas experimentales realizadas.

Se trata de analizar la variación temporal al milisegundo, de las magnitudes eléctricas y mecánicas del conjunto Grupo Electrónico / Motor eléctrico propulsor, en los transitorios de arranque directo y en vacío de los propulsores mediante un contactor, que se considera el arranque más severo y rápido. Se ha trabajado con motores eléctricos en vacío, porque se considera representativo y es más simple la experimentación. Los valores de tensiones y corrientes son los mismos durante el transitorio, en vacío que, en carga, pues vienen determinados por las secciones de hierro y cobre del motor y el generador, solo los tiempos de actuación de los reguladores y su estabilización, se alargan por las inercias y condiciones de carga.

La frecuencia, refleja la velocidad de rotación del alternador. Su variación refleja las energías e inercias en juego y la actuación del regulador de combustible, del motor térmico del grupo electrógeno.

El alternador síncrono interpreta como un cortocircuito, el arranque directo en vacío de un motor eléctrico de inducción. Al ser la velocidad de rotación nula, la fuerza electromotriz (E) aún no existe y la resistencia de los devanados es baja, por cuestiones de rendimiento. Se produce una gran demanda de corriente instantánea del generador. Esta demanda de corriente convertida en par mecánico, frena el motor térmico que arrastra al alternador, cuyo control ha de aumentar, el aporte de combustible al motor Diesel.

La frecuencia es proporcional a la velocidad de giro, suele caer durante este transitorio, para que la inercia de rotación del alternador, compense el retardo de la reacción del sistema de regulación de combustible, del motor térmico.

Las condiciones iniciales de las pruebas con el sistema (ACEE) 7,4 kJ/25 A, fueron:

- Puesta en marcha del sistema inercial, controlado por aceleración constante (rampa).
- Frenado regenerativo del sistema, controlado por deceleración constante (rampa).

Durante los ensayos realizados se han medido, para análisis y comparación posterior, las siguientes variables:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** es la tensión eficaz generada por el alternador, estando en vacío, se calcula como  $V_{rms} = (V_{pico\ vacío} / \sqrt{2})$ , por la forma senoidal de V.

## Mediciones experimentales

- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** es la tensión eficaz mínima generada por el alternador, durante el arranque de la carga, se calcula como  $(V_{rms\ arr} = (V_{pico\ arr} / \sqrt{2})$ .
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea ( $T_e$ ):** es el tiempo que tarda el sistema en recuperar la tensión de línea original. Le llamamos “Tiempo de Recuperación”.
- **Frecuencia mínima en el arranque.** Es la frecuencia a la que cae el alternador, después de una fuerte demanda de corriente.
- **Intensidad de arranque RMS:** es el valor eficaz de la intensidad de arranque, se calcula como  $I_{rms} = (I_{pico} / \sqrt{2})$ .

En la Fig. 89, se muestran las variables que serán registradas sistemáticamente, durante los ensayos de arranques directos en vacío, de diferentes motores de inducción, desde diferentes fuentes de alimentación, principalmente grupos electrógenos.

En azul, la evolución de la tensión del alternador y en rojo la de corriente consumida por la carga.

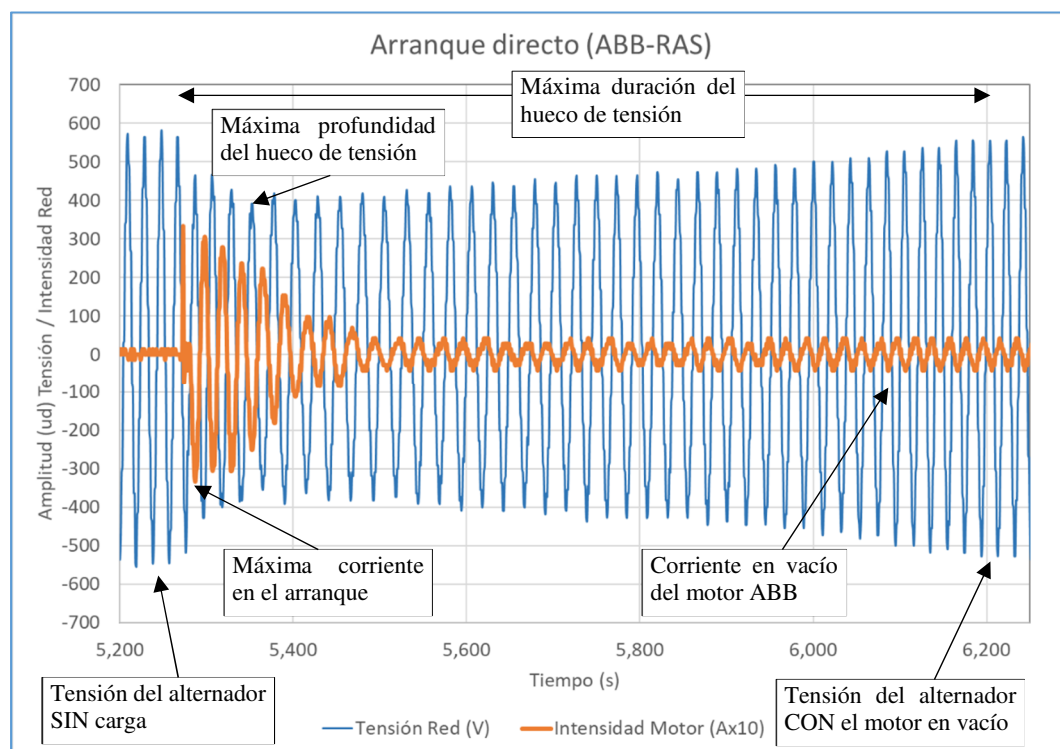
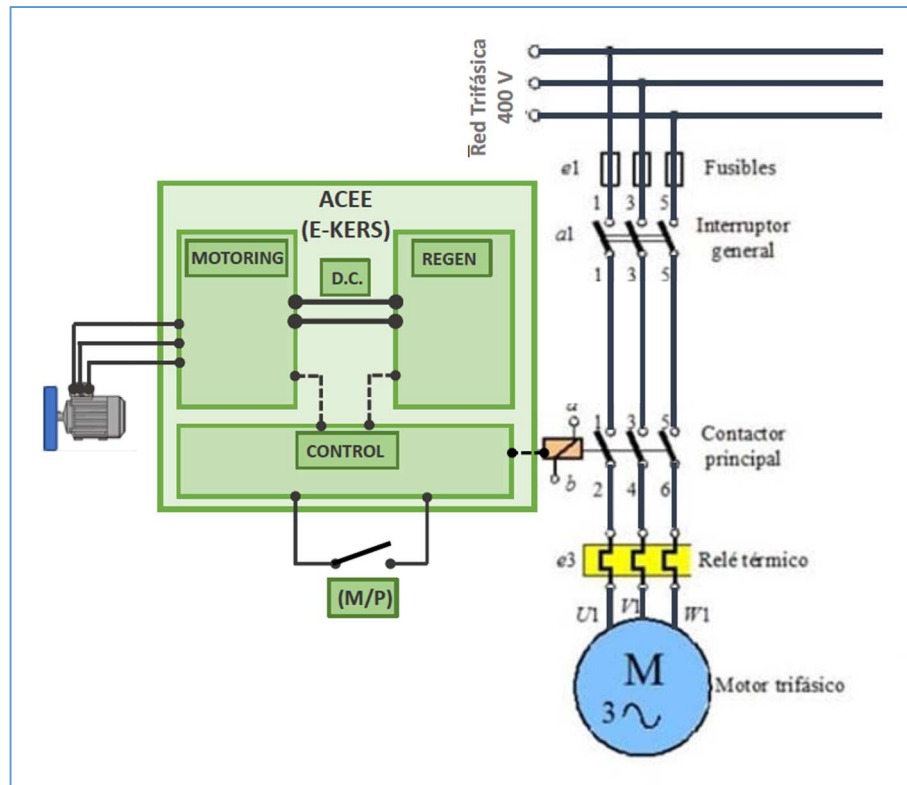


Fig. 89: Variables principales a registrar, durante el arranque directo en vacío, del propulsor ABB 3kW, alimentado de GE RAS 4,6 kW/8,5 kVA,  $\cos\phi=0,5$ . Fuente: Propia

## 8.2 PUESTA EN SERVICIO DEL SISTEMA (ACEE) 7,4 kJ/25 A, CONECTADO A LA RED

Esquema eléctrico que refleja la conexión realizada del sistema (ACEE), en el arranque del motor de inducción (propulsor), con red de potencia infinita, Fig. 90:



**Fig. 90: Esquema de conexión y maniobra del sistema (ACEE) conectado a red de potencia infinita. Fuente: Propia**

Se pretende determinar, la evolución temporal de Tensión  $V$ , Intensidad  $I$ , y Frecuencia  $f$ , de la red de potencia infinita y de diversos alternadores, en el arranque directo en vacío, de motores de inducción y en su desconexión, así como la posible influencia de la regulación de velocidad, por convertidores de frecuencia (VSD), que pudiera afectar a esas variables.

Para analizar estas variables y en especial los huecos de tensión, provocados en su arranque por los motores de inducción, se han elegido los siguientes motores, en adelante “Propulsores”, con las siguientes características:

- Propulsor Novat 4 kW, 400 V 50 Hz.
- Propulsor ABB, 3 kW, 400V, 50 Hz.
- Propulsor ABB con Ventilador, 0,75 kW, 400V, 50 Hz
- Propulsor ABB + ABB Vent. conectados en paralelo, 3,75 kW, 400 V, 50 Hz.

## Mediciones experimentales

Con red de potencia infinita Fig. 91, la caída o huella en la envolvente de tensión en el arranque del propulsor, en términos de hueco de tensión es insignificante, toda vez que los transformadores electromagnéticos que los alimentan, pueden llegar a suministrar  $20 \cdot I_N$ , como corriente de cortocircuito.

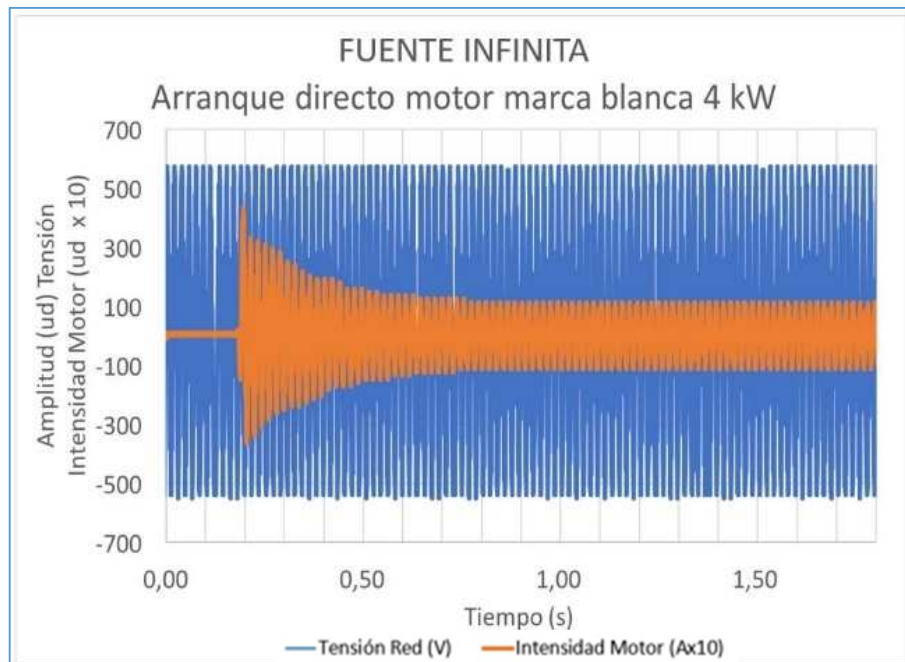


Fig. 91: Arranque del Propulsor Novat con red de potencia infinita, Tensión (azul). Fuente: Propia.

En el primer ensayo, se alimentó el conjunto con una red, considerada de potencia infinita, limitándose por prudencia, la frecuencia de salida máxima del (VSD) “Motoring” a 20 Hz, aumentando progresivamente hasta los 50 Hz, sin anomalías audibles o visibles ni vibraciones, que pudieran deberse a un posible mal funcionamiento. Todo lo anterior evidenció el correcto montaje, conexión, alineación y equilibrado del conjunto. Estas primeras pruebas, fueron realizadas con accionamiento manual desde PC, sin cargar ningún programa de Plc.

A continuación, se procede a realizar ensayos de arranque de diversos propulsores, con diferentes grupos electrógenos:

8.2.1 Ensayos con el Grupo Electrónico  $\cos\phi=1$ , “HONDA”, 400 V, 6,4 kW-6,5 kVA

Se arrancan los motores de referencia directamente alimentados por el GE, para determinar los diferentes transitorios de conexión y desconexión directa mediante contactor, así como la influencia del convertidor de frecuencia (VSD). Se miden V, I, f y su evolución temporal

El grupo electrógeno “HONDA”, modelo ECMT 6500 13.0, comercial de catálogo, está compuesto de:

- Motor Térmico de 6,4 kW potencia nominal, 3000 rpm GX390
- Alternador de 6,5 kVA, 400 V, 3 ph, 3000 rpm, 50 Hz, IP21,  $I_N$ : 10 A,  $I_{CC}$ : 30 A.

Esta proporción de motor térmico y alternador, sólo permite alimentar de forma permanente cargas con  $\cos\phi=1$ . Es decir, que presentará dificultades para arrancar motores de inducción.

El esquema de conexión es el siguiente Fig. 92:

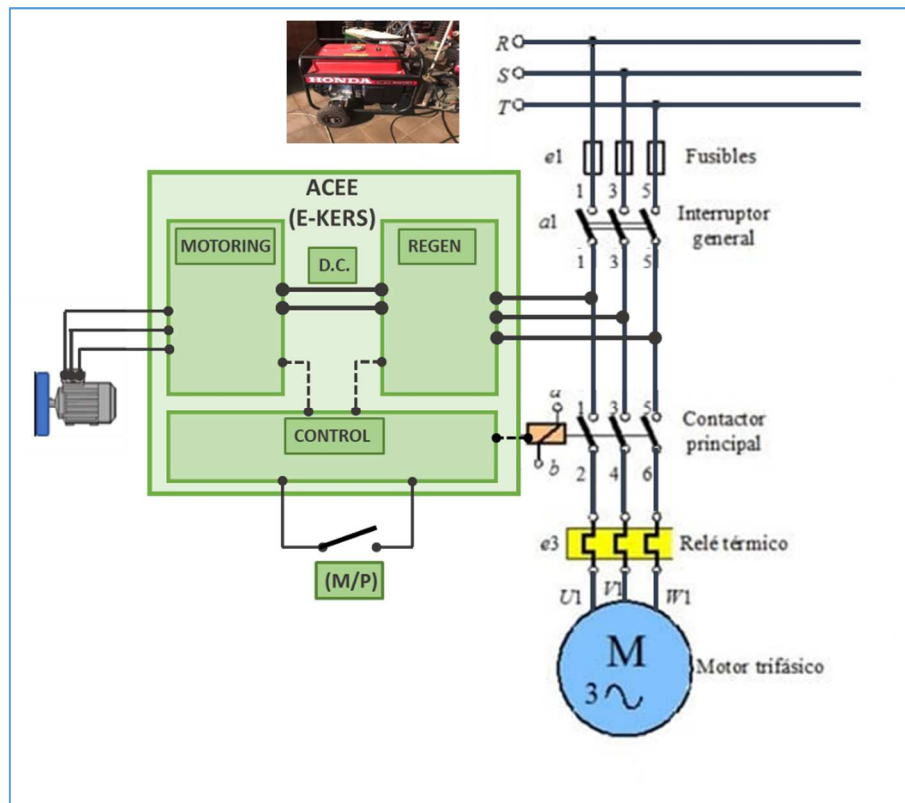


Fig. 92: Esquema de conexión y maniobra del sistema (ACEE) conectado a un grupo electrógeno HONDA 6,4 kW-6,5 kVA,  $\cos\phi=1$ . Fuente: Propia

Para demostrar las dificultades en el arranque de motores de inducción, con este grupo  $\cos\phi=1$ , HONDA 400 V, 6,4 kW-6,5 kVA, se ensayaron los siguientes motores en vacío:



### 8.2.1.1 Propulsor “Novat”.

Características de placa y medidos con red de potencia infinita:

- Fabricante: Novat
- Talla: 112 M
- Tensión nominal: 400 V
- Corriente nominal :8,5 A
- Potencia nominal: 4 kW
- Velocidad nominal: 1.420 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío,  $I_{\text{vacío}}$ : 5,1 A (medida)
- Corriente de arranque,  $I_{\text{arranque}}$ : 70 A (medida)

Se realizan varios arranques directos en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 16 Ficha técnica GE Honda.  
 $\cos\phi=1$

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 398  $V_{\text{rms}}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 159  $V_{\text{rms}}$ , (Profundidad hueco de tensión: 60%)
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 1.520 ms (Duración del hueco de tensión).
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 29,5 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 41  $A_{\text{rms}}$

GE HONDA ECMT 6500 13.0 (comercial)	M. Térmica GX 390	Alternador HONDA
Potencia Nominal	6,4 Kw	6,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		10 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		30 A
$\cos \phi$	1 (en permanencia)	
Par	26,5 Nm a 2500 rpm	
Peso	31,7 kg	
Inercia / Ec Conjunto GE	0,002951 $\text{kgm}^2$ / 0,15 kWs (calculada a partir de ensayos)	

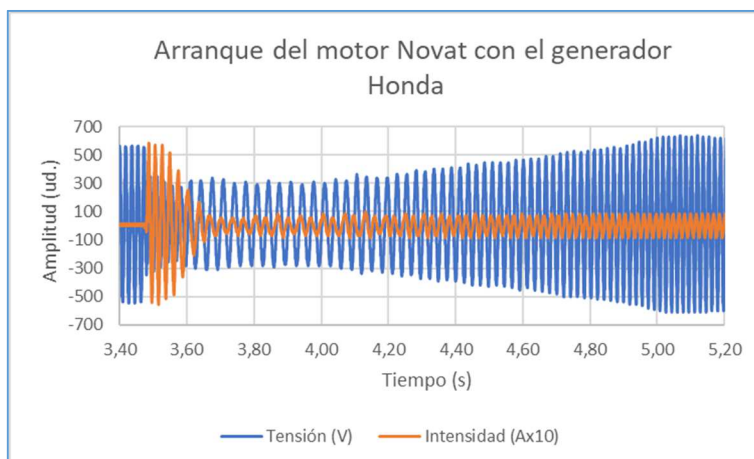
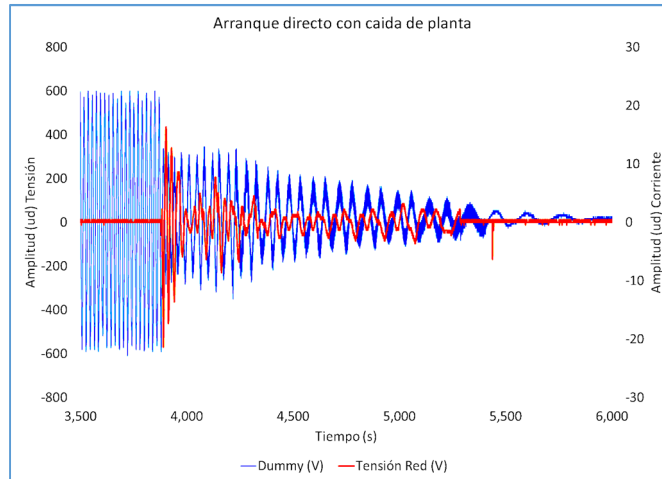


Fig. 93: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA 6,4 kW/6,5 kVA,  $\cos\phi=1$ , alimentando el arranque directo, en vacío del propulsor Novat. Profundidad del hueco de tensión del 60% y duración de 1.520 ms. Fuente: Propia

Se ha conseguido reproducir en el laboratorio, una caída de planta controlada que se toma como referencia. En el arranque de este Propulsor Novat con el GE HONDA, se producía un calado del motor térmico, en dos de cada diez arranques, a pesar de ser el alternador de potencia nominal 60 % superior, tal como se muestra en la Fig. 94:



**Fig. 94: Calado de Máquina térmica del GE HONDA  $\cos\phi=1$ , 6,4 kW/6,5 kVA, en el arranque directo, en vacío del Propulsor Novat de 4 kW. Fuente: Propia**

Queda pues demostrada experimentalmente, la deficiente adecuación de este grupo electrógeno, para al arranque de motores de inducción.

Los huecos de tensión, afectan a todas las otras cargas alimentadas por este grupo electrógeno.



### 8.2.1.2 Propulsor “ABB”.

Características de placa y medidos con red de potencia infinita:

- Fabricante: ABB
- Talla: 100 LD
- Tensión nominal: 400 V
- Corriente nominal: 6,3 A
- Potencia nominal: 3 kW
- Velocidad nominal: 1.445 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío,  $I_{\text{vacío}}$ : 4 A (medida)
- Corriente de arranque,  $I_{\text{arranque}}$ : 43 A (medida)

Se realizan varios arranques directos en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 404  $V_{\text{rms}}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 364  $V_{\text{rms}}$  (Profundidad hueco de tensión: 10%)
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 570 ms. (Duración hueco tensión)
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 45 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 16  $A_{\text{rms}}$

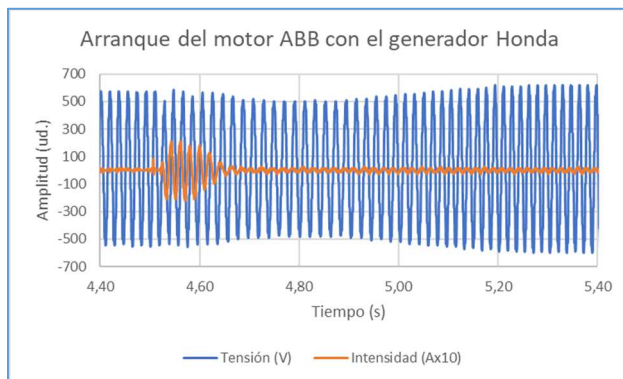


Fig. 95: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA  $\cos\phi=1$ , 6,4 kW/6,5 kVA frente al arranque directo, en vacío del propulsor ABB, Profundidad del hueco de tensión del 10% y duración de 570 ms. Fuente: Propia

Tabla 17 Ficha técnica GE Honda.  $\cos\phi=1$

GE HONDA ECMT 6500 13.0 (comercial)	M. Térmica GX 390	Alternador HONDA
Potencia Nominal	6,4 Kw	6,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		10 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		30 A
$\cos \phi$	1 (en permanencia)	
Par	26,5 Nm a 2500 rpm	
Peso	31,7 kg	
Inercia / $E_c$ Conjunto GE	0,002951 $\text{kgm}^2$ / 0,15 kW (calculada a partir de ensayos)	

### 8.2.1.3 Propulsor Ventilador “ABB”.

Características de placa y medidos con red de potencia infinita:

- Fabricante: ABB
- Talla: 80 A
- Tensión nominal: 400 V
- Corriente nominal: 1,9 A
- Potencia nominal: 0,75 kW
- Velocidad nominal: 2.850 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío,  $I_{\text{vacío}}$ : 0,8 A (medida)
- Corriente de arranque,  $I_{\text{arranque}}$ : 17 A (medida)

Se realizan varios arranques directos en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 411  $V_{\text{rms}}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 337  $V_{\text{rms}}$  (Profundidad del hueco de tensión: 18%)
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 610 ms (Duración del hueco de tensión).
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 44 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 12  $A_{\text{rms}}$

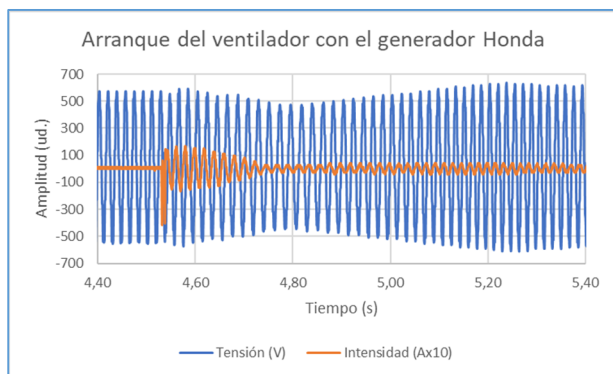


Fig. 96: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA  $\cos\phi=1$ , 6,4 kW/6,5 kW, frente al arranque directo, en vacío del propulsor Ventilador ABB, Profundidad del hueco de tensión del 18% y duración de 610 ms. Fuente: Propia

Tabla 18 Ficha técnica GE Honda.  $\cos\phi=1$

GE HONDA ECMT 6500 13.0 (comercial)	M. Térmica GX 390	Alternador HONDA
Potencia Nominal	6,4 Kw	6,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		10 A
$I_{cc}$ Cortocircuit		30 A
$\cos \phi$	1 (en permanencia)	
Par	26,5 Nm a 2500 rpm	
Peso	31,7 kg	
Inercia / $E_c$	0,002951 $\text{kgm}^2$ / 0,15 kW $s$	
Conjunto GE	(calculada a partir de ensayos)	

### 8.2.1.4 Propulsor “ABB” + Propulsor Ventilador “ABB”.

Se conectan los dos motores anteriores en paralelo.

Se realiza un arranque directo en vacío simultaneo y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 418  $V_{rms}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 297  $V_{rms}$  (Profundidad del hueco de tensión: 29%).
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 1.000 ms (Duración del hueco de tensión).
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 38 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 24  $A_{rms}$

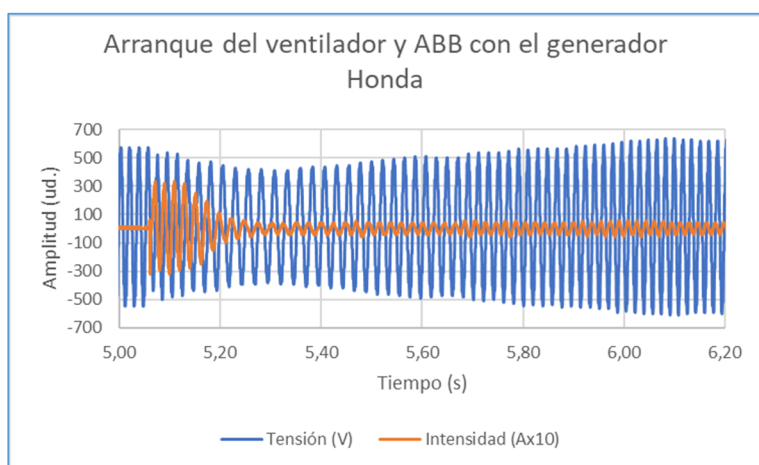


Fig. 97: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo HONDA 6,4 kW/6,5 kVA, frente al arranque directo, en vacío del Propulsor ABB + Propulsor Ventilador ABB en paralelo, Profundidad del hueco de tensión del 29% y duración de 1.000 ms. Fuente: Propia

Tabla 19 Ficha técnica GE Honda  $\cos \phi=1$

GE HONDA ECMT 6500 13.0 (comercial)	M. Térmica GX 390	Alternador HONDA
Potencia Nominal	6,4 Kw	6,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		10 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		30 A
$\cos \phi$	1 (en permanencia)	
Par	26,5 Nm a 2500 rpm	
Peso	31,7 kg	
Inercia / Ec Conjunto GE	0,002951 $kgm^2$ /0,15 kW (calculada a partir de ensayos)	

8.2.2 Ensayos con el Grupo Electrógeno cos  $\phi=0,5$ , “RAS”, 400 V, 4,6 kW-8,5 kVA

Se ha observado, en los ensayos anteriores, que un grupo electrógeno comercial como el HONDA ECMT 6500, compuesto por una máquina térmica de 6,4 kW y un alternador de 6,5 kVA, cos  $\phi=1$ , no produce suficiente corriente reactiva transitoria, para soportar los arranques directos de un motor de 4 kW. Por esta razón, se decidió mejorar las prestaciones del grupo electrógeno de catálogo, aumentando una talla el alternador (para aumentar la reactiva) y a la vez, reducir la máquina térmica (para demostrar que no es un problema de potencia activa), formándose el grupo electrógeno “RAS”, compuesto de:

- Motor Térmico de 4,6 kW nominales, a 3.000 rpm.
- Alternador sobredimensionado TEKEL tipo TT8,5, 8,5 kVA, 400 V, 3 ph, 3000 rpm, 50 Hz, IP21,  $I_N$ : 12,3 A,  $I_{CC}$ : 37 A,

Este conjunto puede alimentar en permanencia, una carga eléctrica con cos  $\phi=0,5$ .

Con este grupo electrógeno RAS, se ensayan los mismos motores en vacío, para demostrar su mejor comportamiento:

### 8.2.2.1 Propulsor “Novat”.

Características de placa y medidos con red de potencia infinita:

Tabla 20 Ficha técnica GE RAS.  $\cos \phi=0,5$

- Fabricante: Novat
- Talla: 112 M
- Tensión nominal: 400 V
- Corriente nominal :8,5 A
- Potencia nominal: 4 kW
- Velocidad nominal: 1.420 rpm
- Frecuencia:50 Hz
- Corriente en vacío,  $I_{\text{vacío}}$ : 5,1 A (medida)
- Corriente de arranque,  $I_{\text{arranque}}$ : 70 A (medida)

GE "RAS" (especial)	HONDA 9.0	Máquina Térmica GX 270	Alternador Tekel TT 8,5
Potencia Nominal		4,6 Kw	8,5 kVA
rpm		3000	3000
Frecuencia			50 Hz
$I_N$ Nominal			12,3 A
$I_{cc}$ Cortocircuito			37 A
$\cos \phi$	0,5 (en permanencia)		
Par		19,1 Nm a 2500 rpm	
Peso		25,8 kg	
Inercia / $E_c$ conjunto GE	0,003497 kgm <sup>2</sup> /0,17 kW (calculada a partir de ensayos)		

Se realizan varios arranques directo en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 418  $V_{\text{rms}}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 209  $V_{\text{rms}}$  (Profundidad del hueco de tensión: 50%)
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 820 ms (Duración del hueco de tensión)
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 30,3 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 48  $A_{\text{rms}}$

Profundidad y duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (50%/820 ms vs 60%/1.520 ms)

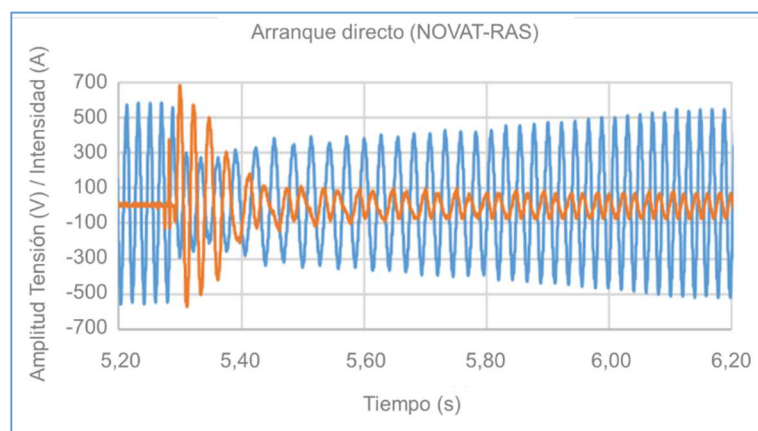


Fig. 98: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo electrógeno RAS  $\cos \phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA, alimentando al arranque directo, en vacío del propulsor Novat, Profundidad del hueco de tensión del 50% y duración de 820 ms. Fuente: Propia

### 8.2.2.2 Propulsor “ABB”.

Características de placa y y medidos con red de potencia infinita:

- Fabricante: ABB
- Talla: 100 LD
- Tensión nominal: 400 V
- Corriente nominal: 6,3 A
- Potencia nominal: 3 kW
- Velocidad nominal: 1.445 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío,  $I_{\text{vacío}}$ : 4 A (medida)
- Corriente de arranque,  $I_{\text{arranque}}$ : 42,9 A (medida)

Se realizan varios arranques directos en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 418  $V_{\text{rms}}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 343  $V_{\text{rms}}$  (Profundidad del hueco de tensión: 18%)
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 220 ms. (Duración del hueco de tensión)
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 45,5 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 10  $A_{\text{rms}}$

Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (18%/220 ms vs 10%/570 m)

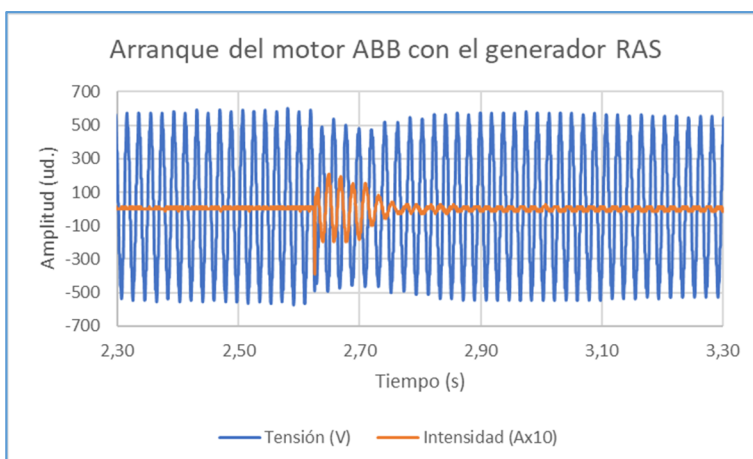


Fig. 99: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo RAS  $\cos \phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA frente al arranque directo, en vacío del propulsor ABB, Profundidad del hueco de tensión del 18% y duración de 220 ms. Fuente: Propia

Tabla 21 Ficha técnica GE RAS  $\cos \phi=0,5$

GE HONDA “RAS” 9.0 (especial)	M. Térmica GX 270	Alternador Tekel TT 8,5
Potencia Nominal	4,6 Kw	8,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		12,3 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		37 A
$\cos \phi$	0,5 (en permanencia)	
Par	19,1 Nm a 2500 rpm	
Peso	25,8 kg	
Inercia / $E_c$ conjunto GE	0,003497 $\text{kgm}^2$ /0,17 kW <sub>s</sub> calculada a partir de ensayos)	

### 8.2.2.3 Propulsor Ventilador “ABB”.

Características de placa:

- Fabricante: ABB
- Talla: 80 A
- Tensión nominal: 400 V
- Corriente nominal: 1,9 A
- Potencia nominal: 0,75 kW
- Velocidad nominal: 2.850 rpm
- Frecuencia: 50 Hz
- Corriente en vacío,  $I_{\text{vacío}}$ : 0.8 A (medida)
- Corriente de arranque,  $I_{\text{arranque}}$ : 17 A (medida)

Se realizan varios arranques directos en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 418  $V_{\text{rms}}$
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 334  $V_{\text{rms}}$  (Profundidad del hueco de tensión: 20%)
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 350 ms. (Duración del hueco de tensión)
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 45,5 Hz

- **Intensidad de arranque RMS:** 9  $A_{\text{rms}}$

Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (20%/350 ms vs 18%/610 ms)

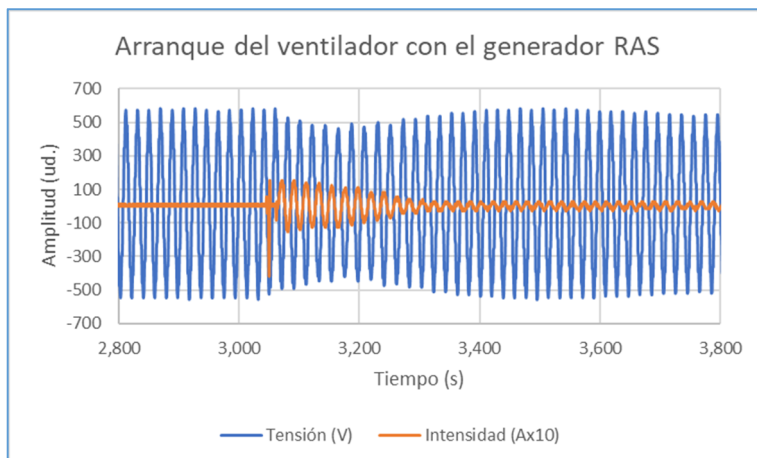


Tabla 22 Ficha técnica GE RAS cos  $\phi=0,5$

GE HONDA “RAS” 9.0 (especial)	Máquina Térmica GX 270	Alternador Tekel TT 8,5
Potencia Nominal	4,6 Kw	8,5 kVA
rpm	3000	3000
Frecuencia		50 Hz
$I_N$ Nominal		12,3 A
$I_{cc}$ Cortocircuito		37 A
cos $\phi$	0,5 (en permanencia)	
Par	19,1 Nm a 2500 rpm	
Peso	25,8 kg	
Inercia / $E_c$ conjunto GE	0,003497 $\text{kgm}^2$ / 0,17 kW (calculada a partir de ensayos)	

Fig. 100: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo RAS cos  $\phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA, frente al arranque directo, en vacío del propulsor Ventilador ABB. Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (20%/350 ms vs 18%/610 ms) Fuente: Propia

### 8.2.2.4 Propulsor “ABB” + Propulsor Ventilador “ABB”.

En este ensayo se requiere visualizar el efecto de una mayor carga, y para ello se conectan simultáneamente los dos motores anteriores en paralelo al GE RAS.

Se realiza un arranque directo en vacío y se obtienen los siguientes resultados:

- **Tensión RMS del alternador en vacío:** 404 V<sub>rms</sub>
- **Tensión RMS mínima del alternador durante el arranque:** 279 V<sub>rms</sub>
- **Tiempo de estabilización de la tensión de línea:** 860 ms.
- **Frecuencia mínima en el arranque:** 39 Hz
- **Intensidad de arranque RMS:** 24 A<sub>rms</sub>

Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (31%/860 ms vs 19%/1.000 ms)

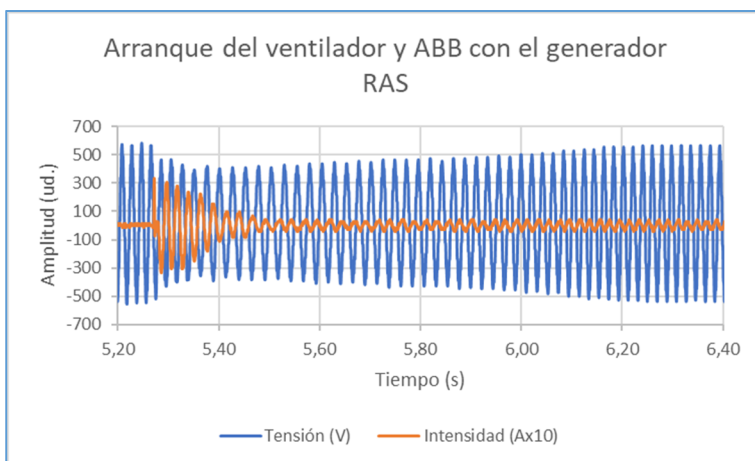


Tabla 23 Ficha técnica GE RAS cos  $\phi=0,5$

GE "RAS" (especial)	HONDA 9.0	M. Térmica GX 270	Alternador Tekel TT 8,5
Potencia Nominal		4,6 Kw	8,5 kVA
rpm		3000	3000
Frecuencia			50 Hz
I <sub>N</sub> Nominal			12,3 A
I <sub>CC</sub> Cortocircuito			37 A
cos $\phi$	0,5 (en permanencia)		
Par		19,1 Nm a 2500 rpm	
Peso		25,8 kg	
Inercia / E <sub>c</sub> conjunto GE	0,003497 kgm <sup>2</sup> / 0,17 kW (calculada a partir de ensayos)		

Fig. 101: Variación de la tensión de red y corriente de arranque, grupo RAS cos  $\phi=0,5$ , 4,6 kW/8,5 kVA, frente al arranque directo, en vacío del propulsor ABB + propulsor Ventilador ABB, en paralelo, Duración del hueco de tensión menores respecto al grupo electrógeno Honda (31%/860 ms vs 19%/1.000 ms). Fuente: Propia



## Mediciones experimentales

### 8.3 EVOLUCIÓN DE LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN DEL ALTERNADOR, CONTROLADA POR EL (AVR)

La recuperación de la tensión de la red en un alternador síncrono, se produce mediante el sistema de regulación (AVR), que controla la corriente de excitación inyectada a la rueda polar (rotor) y por tanto, es de máxima importancia estudiar y analizar como varía esta.

Para ello se monta un shunt, en la caja de bornes del (AVR) del alternador “Tekel” del GE  $\cos\phi=0,5$ , “RAS” 4,6 kW- 8,5 kVA, a fin de registrar y medir la corriente de excitación en el osciloscopio.

Se pretenden registrar simultáneamente varios parámetros, para visualizar su evolución en el tiempo.

Se realizan varios conjuntos de ensayos de arranque directo en vacío, del motor Novat con el sistema (ACEE) conectado, comparando las diferentes variables en color Rojo (CON ACEE) y en color Azul (SIN ACEE), las variables registradas son las siguientes, Fig. 102:

- Tensión de red.
- Intensidad de arranque de la carga
- Intensidad de la excitación.  $I_{exc}$ .
- Tensión del Bus DC.

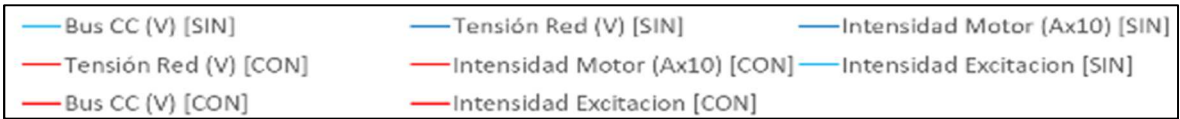
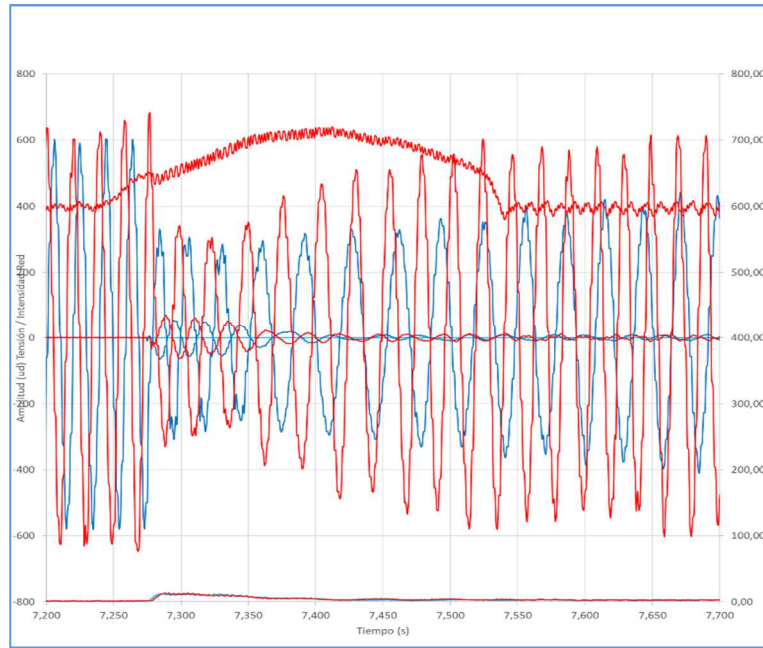


Fig. 102: Arranque directo propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, variación Intensidad de Excitación y propulsor, Bus DC y Tensión de red, **con** y **sin** el sistema (ACEE). Fuente: Propia

- Discretizando la corriente de excitación y la corriente de arranque del motor, se observa en la Fig. 103 cómo evolucionan durante el transitorio de arranque del propulsor.

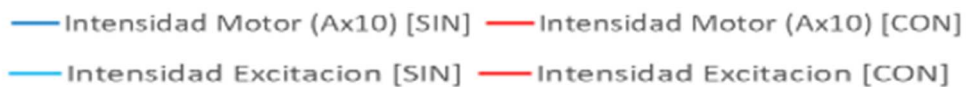
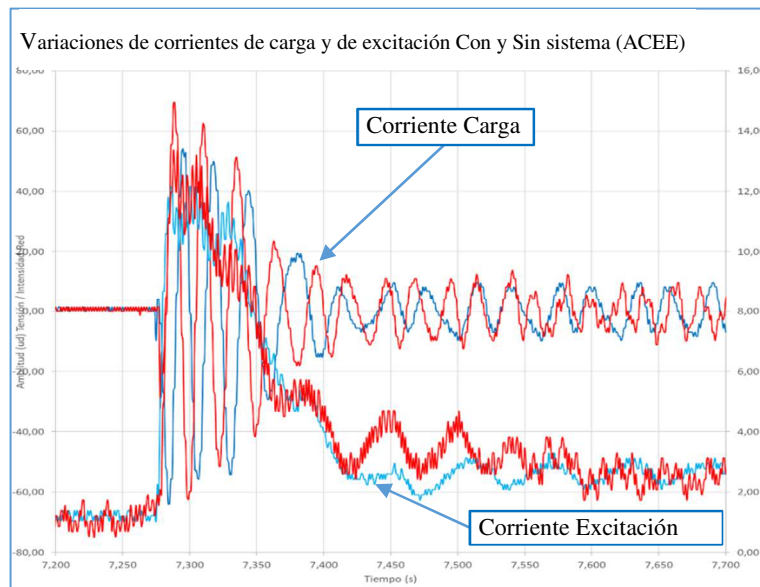
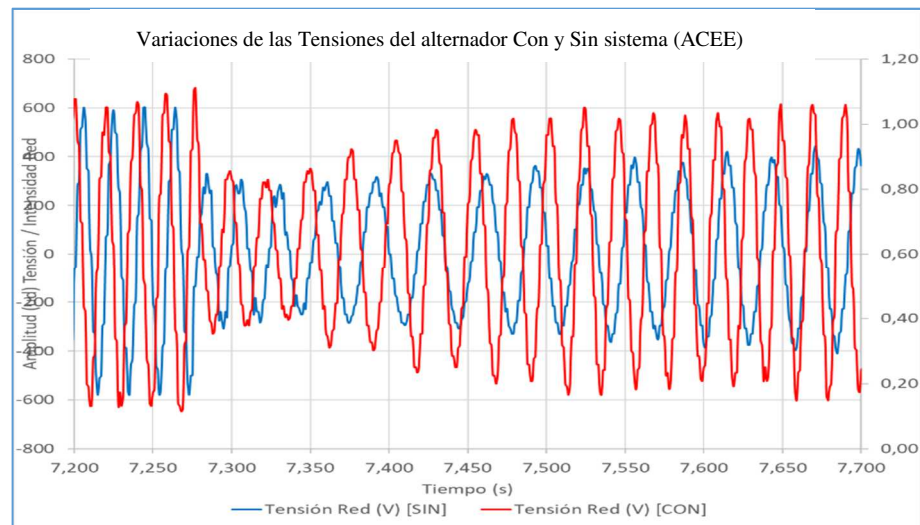


Fig. 103: Arranque directo, en vacío, del propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, comparativa Corriente propulsor y Corriente Excitación Alternador. Fuente: Propia

## Mediciones experimentales

Si comparamos ahora la evolución, solamente de las tensiones del alternador, se observa en la Fig. 104:

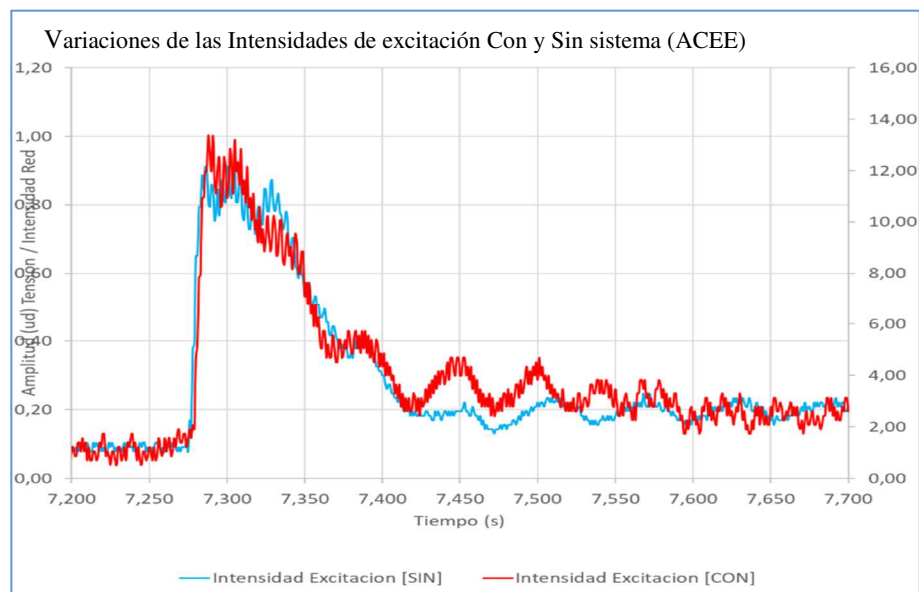


**Fig. 104:** Arranque directo, en vacío del propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, tiempo de recuperación del alternador **CON** y **SIN** sistema (ACEE). Fuente: Propia

Con el sistema (ACEE) conectado y descargando en modo anticipativo, se observa:

- La tensión de red incrementa su valor antes del arranque del propulsor (+20%)
- Es menor el hueco de tensión generado (-43%)
- Se recupera la tensión inicial en menor tiempo (-60%)
- La frecuencia de la tensión del alternador se mantiene en valores más elevados (+10%).

Finalmente, si comparamos en la Fig. 105 las corrientes de excitación separadas, se observa que:



**Fig. 105:** Arranque directo, en vacío del propulsor Novat, alimentado por grupo electrógeno RAS, corrientes de excitación, **CON** y **SIN** sistema (ACEE) Fuente: Propia

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

La forma de la corriente de excitación SIN y CON (ACEE), no varía sustancialmente excepto en su amplitud, ya que la caída de tensión y frecuencia es tan profunda, que en ambos casos el sistema (AVR) del alternador da toda su energía y no puede dar más.

Es de destacar la pendiente de la subida de la corriente de excitación, que indica que la reacción del sistema (AVR) es muy rápido con el arranque de la carga.

### 8.4 EVOLUCIÓN DEL REGULADOR DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR TÉRMICO

La Potencia Activa, Par y Velocidad de rotación, dependen directamente del caudal de combustible que recibe el motor térmico, y en consecuencia de cuanto abre o cierra la mariposa del carburador.

Se ha considerado de interés técnico, obtener la gráfica de la respuesta en el tiempo, del grado de apertura del carburador del motor térmico, en función de la demanda de par, para comparar las pendientes y retardos con el control de tensión (AVR).

Para ello se ha instalado una sonda lineal, en la palanca de combustible del motor térmico del GE “RAS” 4,6 kW-8,5 kVA, para monitorizar la apertura del carburador.

Modelo: UIPMA0501472XCB Sensor Desplazamiento, 50mm, 4,7 k, 30%. Es una sonda que trabaja por la presión que se ejerce sobre su pista. Se muestra el sensor y su montaje en Fig. 106, 107



Fig. 106: Sensor de Desplazamiento para medir carrera del carburador. Fuente: Propia

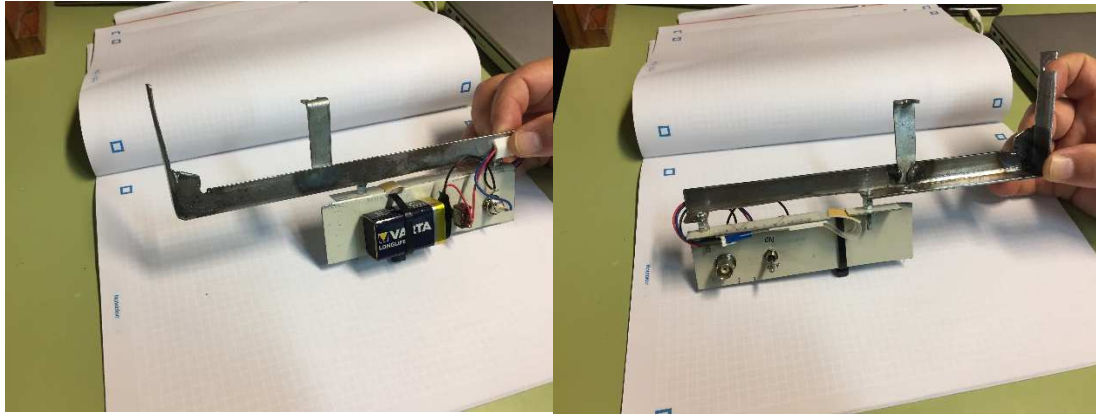


Fig. 107: Montaje para registro del desplazamiento de la corredera de combustible, en grupo GE RAS. Fuente: Propia

Con este montaje procedemos a calibrar y verificar la linealidad de la resistencia del sensor, con resultados satisfactorios Fig. 108.

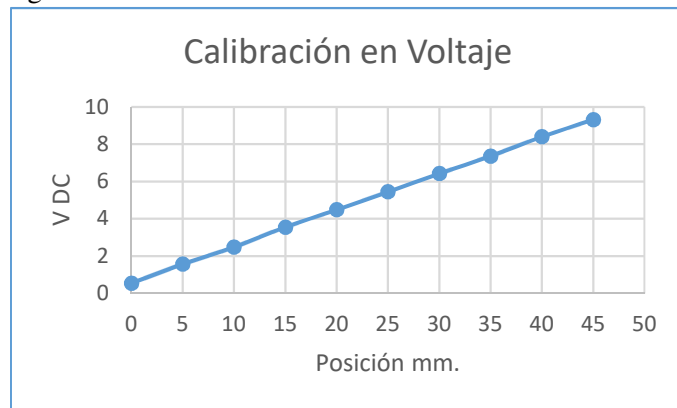


Fig. 108: Calibración resistencia lineal de posición. Fuente: Propia

Tabla 24 Calibración sonda lineal de posición.

Posición	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Voltaje	0,54	1,57	2,48	3,55	4,48	5,44	6,42	7,36	8,4	9,32

Posteriormente, se sustituye la batería de 9V, por una fuente controlada ajustable digital, para tener estabilidad de las lecturas, tal como mostramos a continuación Fig. 109.

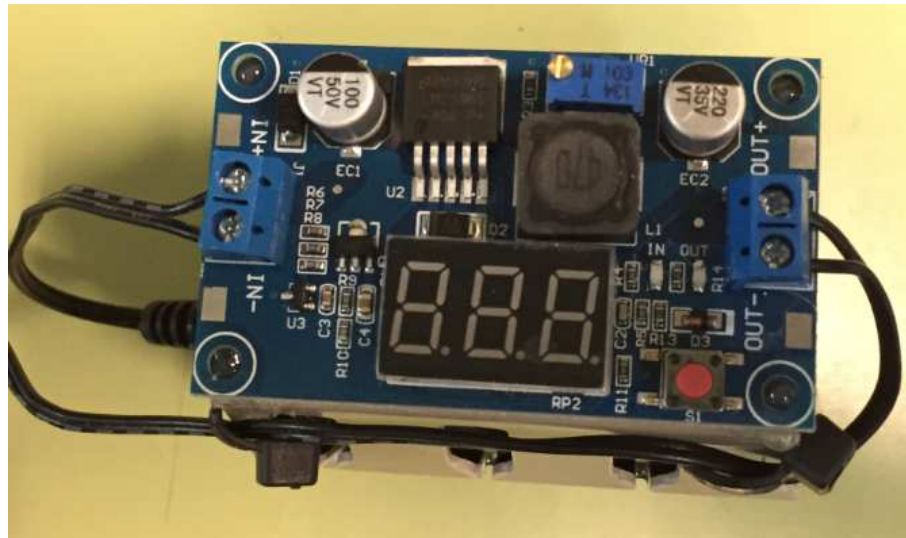


Fig. 109: Fuente DC digital controlada. Fuente: Amazon

Se realiza una primera serie de registros en el osciloscopio, añadiendo un nuevo canal para registrar este nuevo parámetro. Las pruebas se realizan con el propulsor “Novat” en arranques directos en vacío, alimentados por el grupo electrógeno,  $\cos\phi=0,5$  “RAS” 4,6 kW-8,5 kVA.

Los primeros resultados son desalentadores, ya que las vibraciones y la falta de alineación del puntero del sensor, provocan registros dominados por el ruido, ver Fig 110:

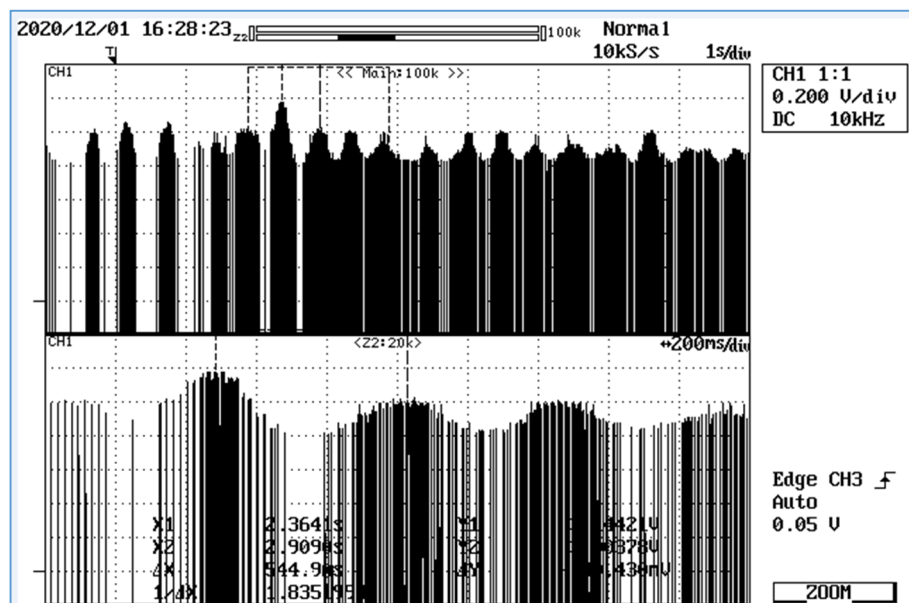


Fig. 110: Primeros registros de la señal de la resistencia lineal del carburador. Fuente: Propia

Se realiza un nuevo montaje, con una bola en el extremo del puntero del sensor, para ejercer una presión uniforme, siendo el resultado similar al anterior, con oscilaciones continuas.

Ajustando mejor mecánicamente el conjunto, se logran finalmente señales limpias y representativas, del desplazamiento de la palanca del carburador, tal como se observa a continuación:



## Mediciones experimentales

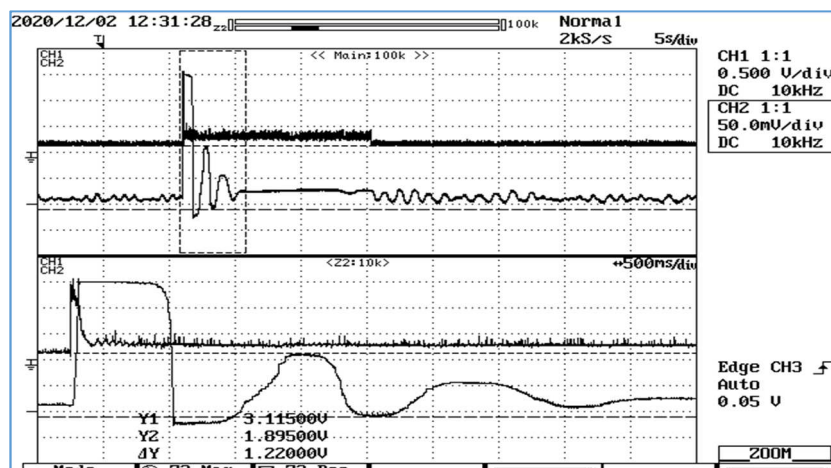


Fig. 111 Registro de señal de la variación de resistencia lineal-corredora del carburador. Fuente: Propia.

En la Fig. 111 se añade el canal de la intensidad de excitación  $I_{exc}$ , que como se ve en el zoom de abajo, y tal como se esperaba, no son simultáneos ya que sus bucles de control V-Q y f-P, son de tiempos de reacción y naturalezas tecnológicas muy distintas.

En una ampliación mayor, se ve con mayor detalle, Fig. 112:

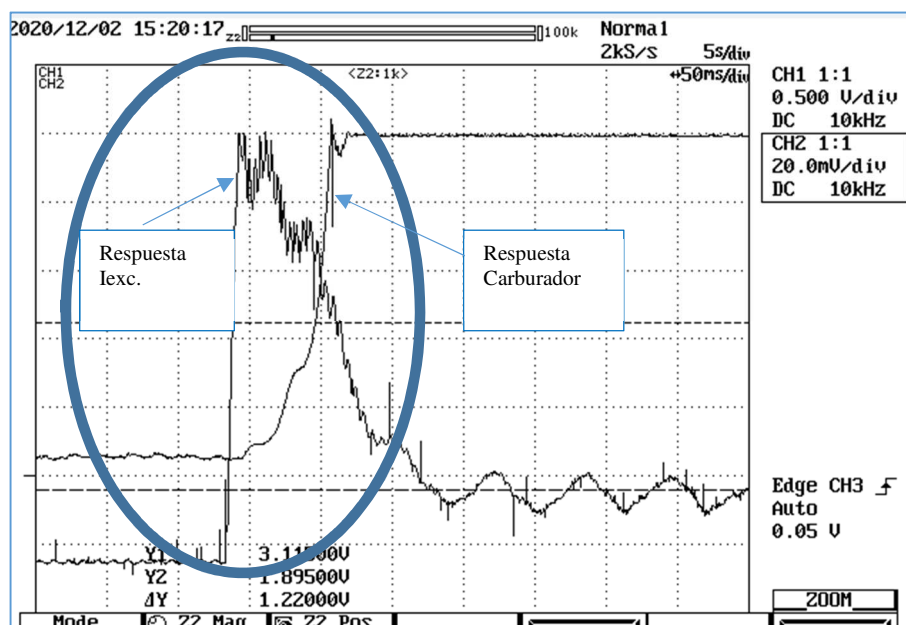


Fig. 112: Registro de la evolución del recorrido carburador y del tiempo de reacción de la Intensidad de excitación  $I_{exc}$ . Fuente: Propia

Como se ve, la reacción de la  $I_{exc}$  es casi inmediata, mientras que la mariposa del carburador se desplaza mucho más tarde y con menos gradiente.

Las lecturas en el osciloscopio permiten cuantificar estos valores Fig. 113:

	Tiempo que tarda en alcanzar el máximo ms	Retardo entre la respuestas de carburador y Iexc (entre ceros) ms.	Valor inicial A.	Valor Final A.	Carrera Carburador posicion inicial sin carga mm.	Carrera Carburador posicion final del transitorio de arranque mm.
Respuesta I excitación	9,5	11,5	1,2	11,7	10,9	23,1
Respuesta carburador	63					
Numero de veces	7				10,9	23,1

Fig. 113: Registros de la respuesta temporal, de Carburador e Iexc del grupo electrógeno RAS, ante el arranque en vacío del propulsor Novat. Fuente: Propia

La respuesta del controlador de la corriente de excitación del alternador (Iexc) de 9,5 ms., es 7 veces más rápida que la del carburador de la máquina térmica, que responde en 63 ms.

El sistema (AVR) del alternador “Tekel” es mucho más rápido que el desplazamiento de la mariposa del carburador o controlador del combustible.

Las diferentes tecnologías de los controladores respectivos, hace que los tiempos de reacción vayan de décimas de segundo para la carrera de la mariposa del carburador, a milésimas de segundo en la corriente de excitación, según se puede ver en la Fig. 114:

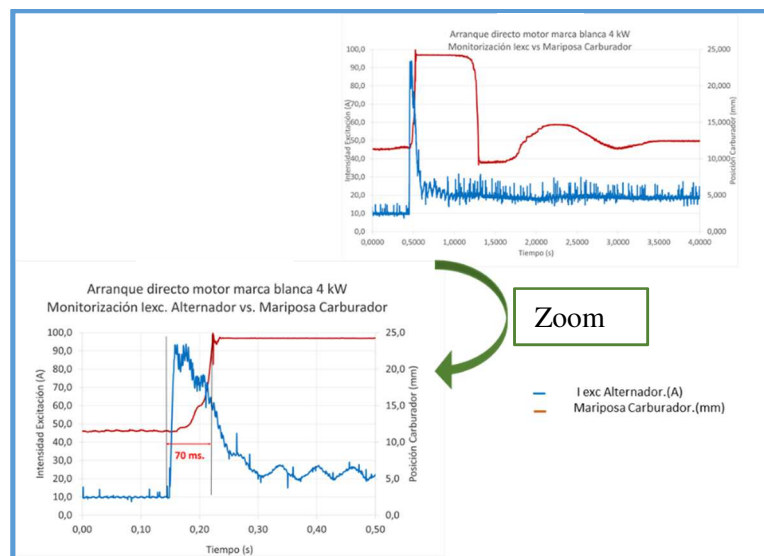


Fig. 114: Tiempos de reacción de la intensidad de excitación 9,5 ms.y del carburador 63 ms., de un alternador sincrónico RAS (4,6 kW / 8,5 kVA) alimentando el arranque directo en vacío, de un motor eléctrico de inducción de 4 kW. Fuente: Propia



8.5 RESUMEN

Como resumen de estos ensayos, a continuación, se presenta una tabla con referencia a los mismos y sus huecos de tensión- Profundidad, producida en cada caso en el arranque directo en vacío:

**Tabla 25 Cuadro resumen de la caracterización de los huecos de tensión producidos por el arranque directo en vacío, de los propulsores de inducción alimentados desde GE HONDA y RAS.**

Características			Ensayo	Resultado	
GE tipo	Motor primario/Motor eléctrico kW/kVA	cos φ conjunto	Propulsor / kW	Hueco: Profundidad (%) Duración (ms)	Caída de Frecuencia: (Hz)
HONDA 13.0	6,4 / 6,5	1	Novat 4 kW (en vacío)	60 / 1.520 (cala 2 de cada 10)	29,5
HONDA 13.0	6,4 / 6,5	1	ABB 3 kW (en vacío)	10 / 570	45,0
HONDA 13.0	6,4 / 6,5	1	Ventilador ABB 0,75 kW (carga)	18 / 610	44,0
HONDA 13.0	6,4 / 6,5	1	ABB+V.ABB 3,75 kW (carga-vacío)	29 / 1.000	38,0
RAS 9.0	4,6 / 8,5	0,5	Novat 4 kW (en vacío)	50 / 820	30,3
RAS 9.0	4,6 / 8,5	0,5	ABB 3 kW (en vacío)	18 / 220	45,5
RAS 9.0	4,6 / 8,5	0,5	Ventilador ABB 0,75 kW (carga)	20 / 350	45,5
RAS 9.0	4,6 / 8,5	0,5	ABB+V.ABB 3,75 kW (carga-vacío)	31 / 860	39

La caída de tensión es más profunda en el GE Honda, 60% que en el RAS 50% por el efecto de sobredimensionado del alternador.

La duración del hueco de tensión es sensiblemente menor con el grupo “RAS”. Mejoras que van desde el 14% y el 61% dependiendo de la carga.

Es debido al sobredimensionado del alternador de este GE, de 8,5 kVA frente a los 6,5 kVA del GE Honda.

El debilitamiento del enlace electromagnético, alarga el transitorio en el tiempo.

La caída de frecuencia, es similar a pesar de la diferente potencia de los motores térmicos. Se demuestra que viene condicionada por las inercias de generación, pues el arranque de los propulsores, es más rápido que la respuesta del regulador de velocidad y combustible.

## 8.6 ENSAYOS DE CONJUNTOS CON EL SISTEMA (ACEE), 7,4 kJ/25 A

La puesta en servicio del sistema (ACEE), hace necesario el ajuste de varios controles, que permitan el giro estable del volante, antes de proceder al aprovechamiento energético de su energía cinética de rotación.

El sistema (ACEE), requiere de unas estrategias de carga-descarga, que afectan mucho a su comportamiento y prestaciones.

Se analizarán en este apartado, 4 estrategias experimentales, que se han ensayado con resultados significativos. Sirven de base para trabajos posteriores y son susceptibles de mejora.

Una vez caracterizados los arranques en vacío de los motores propulsores, con los diferentes grupos electrógenos, el siguiente paso es incorporar al circuito, el Acumulador Cinético (ACEE), por lo que se recuerdan aquí sus características eléctricas:

- Motor de 9 kW, 21 A, 50 Hz, 400 V,  $I_0=8,4$  A,  $I_{max}=165\%*21=35$  A (limitada al 165% por el VSD), 1.440 rpm y  $\cos \phi$  nominal 0,83. Al estar girando en vacío, el motor de inducción no gira a su velocidad nominal, sino que se acerca a la de sincronismo. El (VSD) puede variarlo entre 5 y 50 Hz.

El circuito eléctrico, queda compuesto por:

- Grupo electrógeno RAS, con el Acumulador cinético (ACEE) conectado en paralelo.
- Propulsor Novat, con sus contactores de conexión y protecciones.

## Mediciones experimentales

### 8.6.1 Puesta en servicio del conjunto GE RAS, sistema (ACEE)

Al iniciar las primeras pruebas de descarga del sistema de acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE), actúan las protecciones de los convertidores de frecuencia parando el sistema (ACEE). El código de interrupción “Over Voltage”, indica que se sobrepasa el valor límite del Bus DC (situado en 830 V), lo que significa que el aporte solicitado de energía del acumulador al sistema es excesivo, porque nadie está consumiendo esa energía.

Para solucionar este problema, se reduce el valor del Bus DC a 600 V, para disponer de mayor margen de tensión. Por defecto viene a 700 V. Con este cambio, el sistema funciona y regenera correctamente con disparo manual.

#### 8.6.1.1 Control de regeneración del sistema (ACEE) 7,4 kJ/25 A, por consigna de velocidad controlando la rampa de frenado

En este punto, el control de la regeneración de energía del acumulador, se realiza mediante el control de la velocidad de frenado del volante de inercia, siendo éste el primer parámetro de control que se ensaya.

Se muestra en la Fig. 115, un registro de los primeros ensayos, con el acumulador cinético regenerando, que resultaron fallidos, en el que se pone de manifiesto el disparo de las protecciones de los (VSD) por “Over Voltage”, debido a que se sobrepasa el valor máximo del nivel del Bus DC (830 V) en el frenado regenerativo.

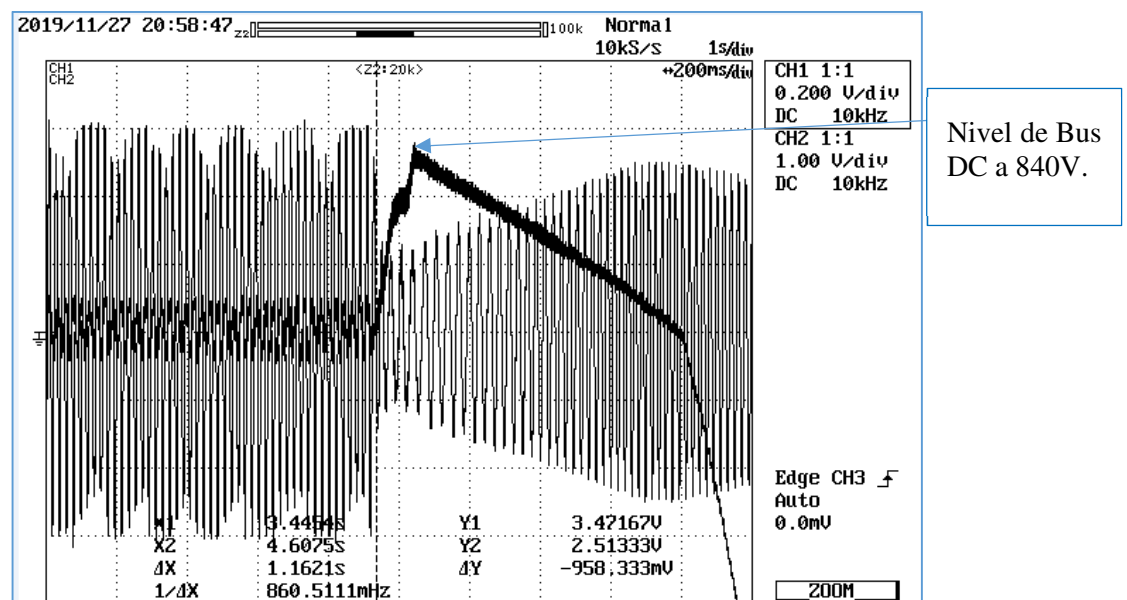


Fig. 115: Disparo del Bus DC al sobrepasar los 830 V. Fuente: Propia

En el arranque directo del motor de inducción en vacío Fig. 116, se observa una caída muy importante de la tensión de red, desde los 390 V hasta 260 V, (33%), llegando en ocasiones hasta > 53% de profundidad.

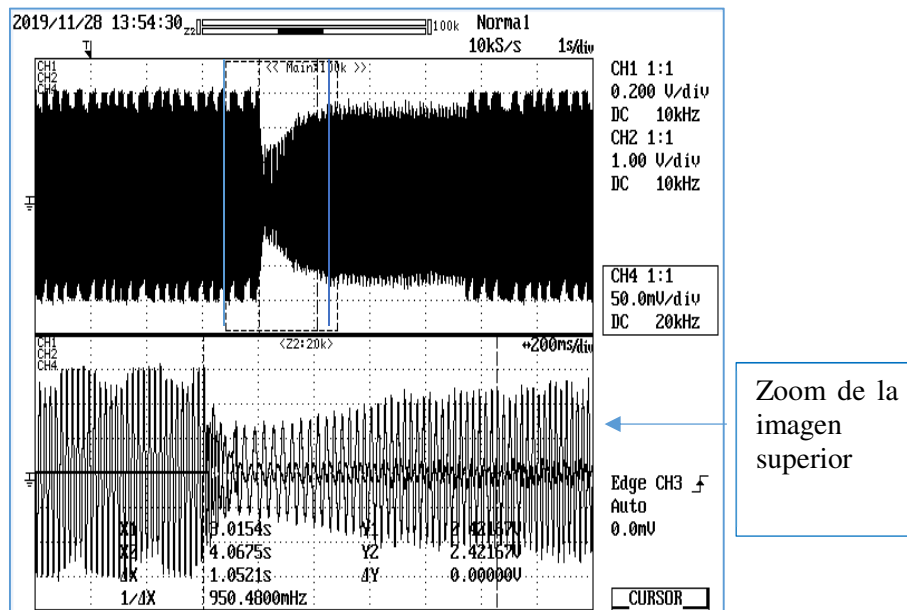


Fig. 116: Caída de Tensión >53% y de Frecuencia 50/33 Hz del grupo RAS y (ACEE) conectado, en el arranque en vacío, del motor Novat de 4 kW. Fuente: Propia

Aunque se realizan con éxito las primeras descargas, el sistema (ACEE) resulta inestable, por conflicto entre los reguladores de tensión y frecuencia del grupo electrógeno y los del sistema (ACEE).

Se aprecia una oscilación de la envolvente de la tensión generada, de un 20% en amplitud y un periodo de unos 80 ms.

En este grupo “RAS” como generador, con el sistema (ACEE) conectado y sin carga, la frecuencia oscila sin carga, desde los 51,2 Hz hasta 49,9 Hz.

El arranque del motor Novat, hace caer hasta los 30 Hz, durante el régimen transitorio.

Con esta configuración, se realizan lecturas de las variables siguientes:

- Corriente nominal de placa del alternador “RAS”, 12,3 A.
- Tensión alternador “RAS” 395 V.
- Corriente consumida sistema (ACEE), en régimen estable: 2,4 A, en su arranque: 7,1 A.
- Corriente consumida Motor Propulsor Novat, en vacío 4,7 A, en su arranque, desde 47 A hasta 93 A. (media: 70 A)

### 8.6.1.2 Consigna de par

La inestabilidad observada en el apartado anterior en tensión y frecuencia, durante el funcionamiento del sistema acumulador en vacío, aconsejan un cambio en el control de la velocidad del volante.

Se decide controlar el volante de inercia del (ACEE) por “par”, en lugar de por “velocidad”, siguiendo la recomendación del director Dr. Ricard Bosch-Tous.

Se observa una gran mejora en el comportamiento del sistema. Gobernar el sistema (ACEE) por consigna de par de su volante asociado, resulta la mejor opción de programación de los (VSD) Motoring y Regen.

La aplicación es energéticamente muy severa, durante las cargas y las descargas de energía del sistema (ACEE), desapareciendo las oscilaciones de tensión y frecuencia con el (ACEE) a velocidad de régimen en vacío, con grandes pares motor y freno, manejando valores de energía cercanos a los 7,4 kJ que acumula el volante de inercia a 1.500 rpm.

A partir de este cambio, se realizan ensayos de frenado regenerativo, de diversa magnitud y el sistema empieza a ser estable. Esto permite pruebas repetitivas fiables a partir de este punto de la experimentación.

Se observa una gran dependencia de la energía regenerada, en relación a:

- **% de par aplicado en el frenado regenerativo** (parámetro Pr.18.013 Motoring). Se baja a niveles del 20%. En el entorno del 30%, el sistema dispara por sobre tensión.
- **Corrientes límites absorbidas** (parámetros 04.005, 04.006 y 04.007 Motoring), el valor óptimo es del 20%. Valor por defecto, programado de fábrica 100%, era el responsable de la severidad de respuesta observada en los primeros ensayos.

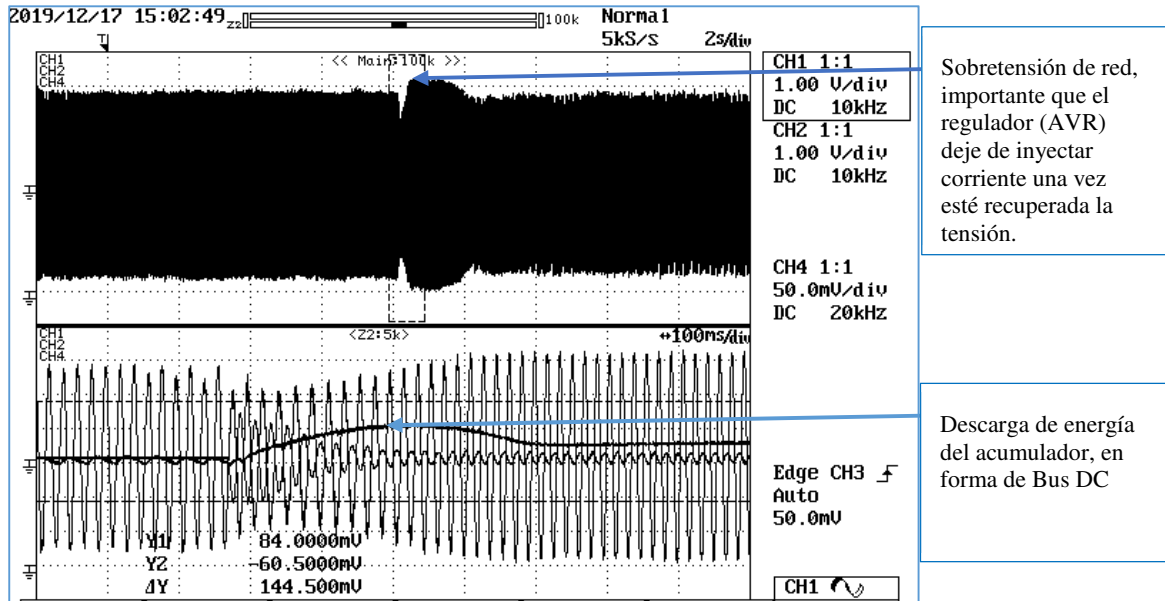
Estos cambios permiten mejorar significativamente la dinámica experimental, obteniendo:

- Repetibilidad de las experiencias.
- Estabilidad del sistema.
- Tensión del alternador estable y en su valor nominal.
- Tiempo de recuperación de la tensión del alternador, más breve.
- Mayor estabilidad en frecuencia del alternador.

### 8.6.1.3 Primeros ensayos de arranque de propulsor

Se registran en el osciloscopio, la tensión del alternador, corriente de consumo de la carga y el nivel de tensión del Bus DC, en arranques directos en vacío, del propulsor Novat alimentado del GE RAS.

Es especialmente interesante reseñar la sobretensión que se produce al final del transitorio de arranque, debida a la descarga del acumulador cinético y por la inercia del sistema (AVR) que sigue inyectando corriente de excitación a la rueda polar, aunque la tensión ya se ha recuperado Fig. 117



**Fig. 117: Registro de Tensión del grupo RAS, Corriente de arranque en vacío del propulsor Novat y primeras Descargas regenerativas del acumulador cinético (ACEE). Fuente: Propia**

La forma de la curva regenerativa, depende del % de frenado del volante (valor par de frenado).

Con la descarga regenerativa del sistema (ACEE) en este primer estadio de ensayos, se observa una mejora en la profundidad y duración del hueco de tensión con la descarga del sistema (ACEE). Siendo éstos los primeros ensayos, existe una gran dispersión en los resultados numéricos, alcanzando valores de mejora de un 30÷40 % en su profundidad y de un 30÷50 % en el restablecimiento de la tensión.

#### 8.6.1.4 Duración de la descarga regenerativa

En estos primeros ensayos, se realizan varios arranques, con el motor ABB con ventilador centrífugo, para simular una carga una carga tipo “propulsor en carga”. El tiempo de duración de la descarga regenerativa, variando la programación de la profundidad de la misma, aporta información interesante.

Se entiende por **profundidad de la regeneración**, la diferencia entre la velocidad nominal del volante de inercia 1.500 rpm y la velocidad a la que dejamos de regenerar.

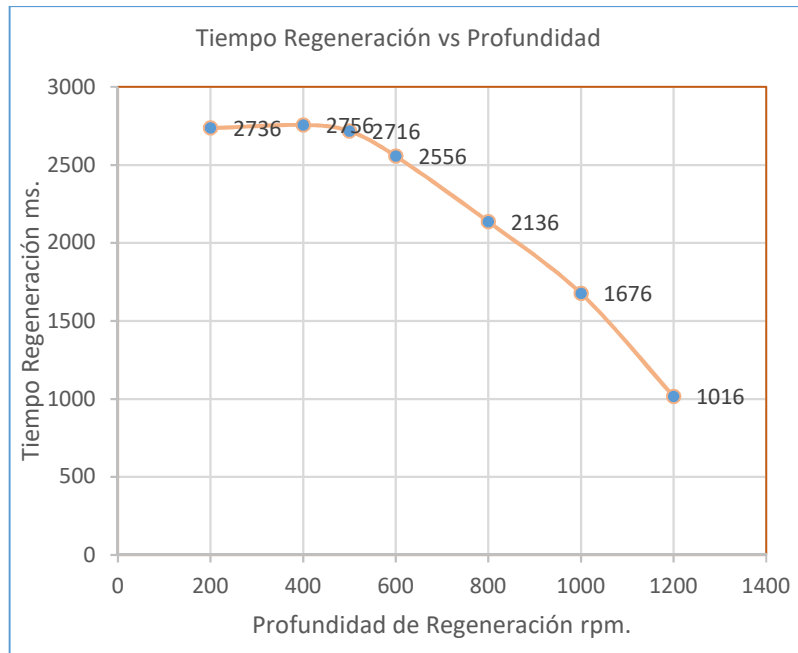
El **tiempo de regeneración**, es la duración de la inyección de energía mediante el aumento del nivel de tensión del Bus DC, respecto al valor de tensión predeterminado por programación.

Este ensayo se realiza cambiando desde el software “M Connect” del PC, el parámetro de rpm mínimas (Pr.15.018), en el convertidor de frecuencia “Motoring” y leyendo en el osciloscopio el tiempo de regeneración. El par de frenado que se programó en el (VSD) “Motoring”, fue del 20% (Pr.18.013).

El resultado, tal como se observa en la Fig. 118, muestra que la duración de la regeneración, aumenta hasta 2.700 ms, mientras el volante de inercia es frenado hasta 600 rpm, punto a partir del cual la curva inicia una forma plana. Este tiempo se considera más que suficiente para el arranque directo en vacío, de los motores y los grupos electrógenos que se utilizan.

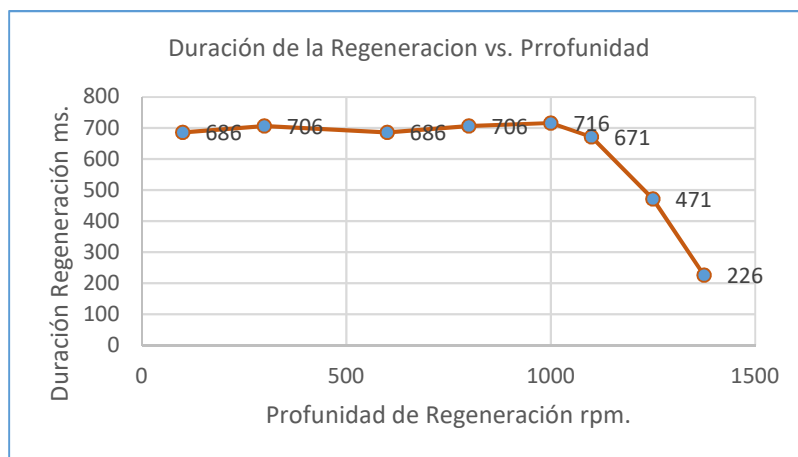
Hasta 600 rpm de profundidad de descarga, el acumulador dispone de energía y a partir de esas revoluciones, el acumulador ha descargado la parte más significativa de la energía que almacenaba.

Con el grupo electrógeno RAS, con generador sobredimensionado, capaz de suministrar corrientes con mayor componente reactiva inductiva,  $\cos \phi=0,5$ , la profundidad del frenado regenerativo máximo (óptimo para este ensayo) es de 600 rpm.



**Fig. 118: Tiempo vs Profundidad de regeneración, arranque en vacío del propulsor ABB con ventilador alimentado por GE RAS. Fuente: Propia**

Se repitió el ensayo, pero ahora con fuente infinita con el siguiente resultado Fig. 119:



**Fig. 119: Tiempo vs Profundidad de Regeneración, arranque en vacío del propulsor ABB con ventilador alimentado por red de potencia infinita. Fuente: Propia**

El resultado es similar al anterior con grupo electrógeno RAS, pero la curvatura se produce a 1.000 rpm en lugar de a 600 rpm. Con fuente infinita necesita menos energía (menor tiempo de regeneración) para recuperarse, debido a que el hueco de tensión generado en el arranque es mucho menor y por tanto la duración de la descarga regenerativa es menor.

Se concluye que, con fuente infinita, la profundidad del frenado regenerativo máximo (óptimo para este ensayo) es de 1.000 rpm.



### 8.6.2 Análisis de armónicos de las tensiones generadas

Durante las pruebas, se analizaron las formas de las ondas de tensión de los dos alternadores, Tekel (RAS) y HONDA en vacío, comparándolas con la de la “red de potencia infinita”, y con la influencia de conectar el sistema (ACEE) a varias cargas, mediante los registros que se muestran y comentan a continuación:

#### 8.6.2.1 Red de potencia infinita

La tensión disponible en el laboratorio, considerada la referencia de potencia infinita, es el resultado del paso por diferentes etapas de transformadores del orden de 50 kVA. Se observa una ligera distorsión, debido al contenido de armónicos, especialmente de tercero y quinto, debido a que el transformador que alimenta al laboratorio está trabajando ligeramente saturado Fig. 120.

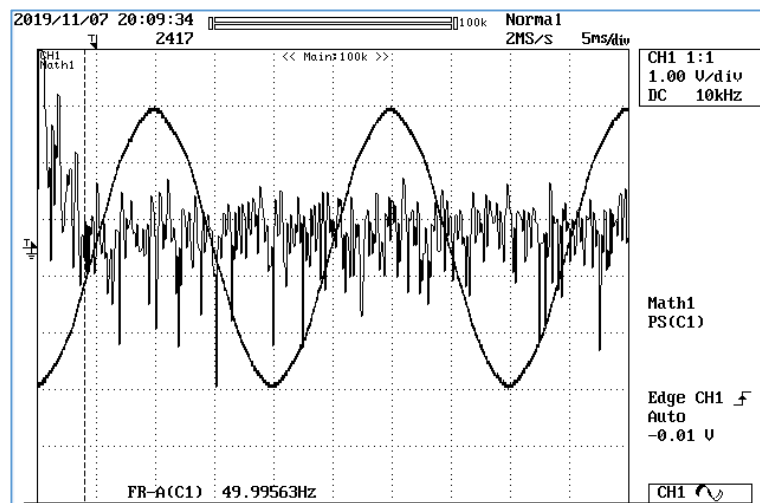


Fig. 120: Registro de contenido de armónicos de la Tensión de la Red de potencia infinita.

Fuente: Propia

### 8.6.2.2 Grupo electrógeno cos $\phi=1$ Honda 6,4 kW / 6,5 kVA 400 V

En vacío, este grupo presenta una onda senoidal muy distorsionada (sucia), se observa un 3<sup>er</sup> armónico muy elevado (150 Hz) y un rizado en sus picos, efecto característico producido por las ranuras del estator del generador y a la insuficiente función de compensación en los polos. El análisis FFT, muestra que esta perturbación tiene trazas de frecuencia alrededor de 1,3 kHz y 2,5 kHz Fig.121.

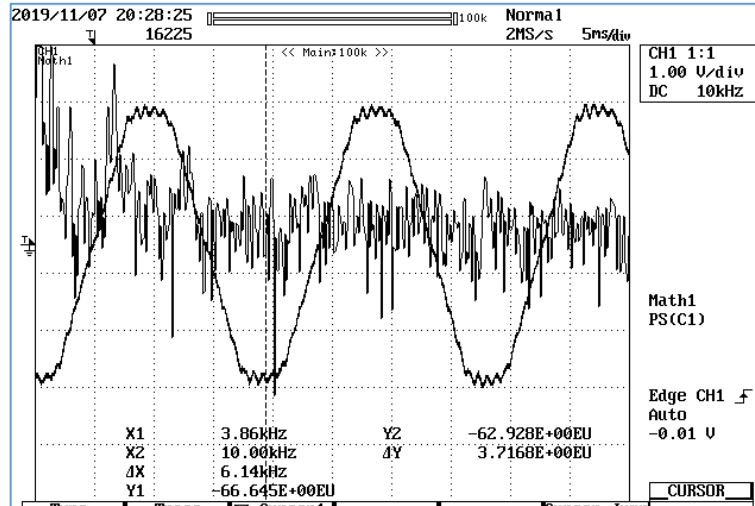


Fig. 121: Registro de contenido de armónicos, de la tensión en vacío del alternador Honda del grupo Honda. Fuente: Propia

### 8.6.2.3 Grupo electrógeno cos $\phi=0,5$ , RAS 4,6 kW / 8,5 kVA 400 V

En vacío, se observa una mayor distorsión de la senoide. Analizando su FFT, además de los armónicos por debajo de 1 kHz, principalmente de 3<sup>er</sup> orden (150 Hz), existen otros de alta frecuencia entre 1,5 y 2 kHz y entre 7,5 kHz y 8,5 kHz Fig. 122.

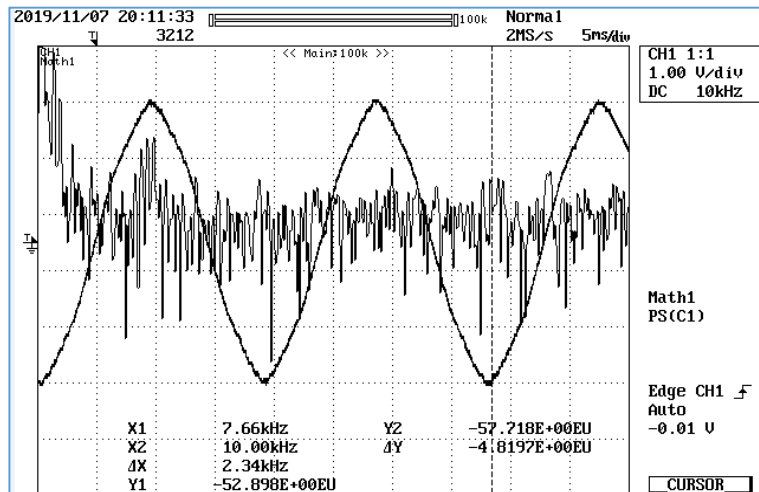


Fig. 122: Registro de contenido de armónicos de la Tensión en vacío del Alternador TEKEL, Grupo RAS. Fuente: Propia

**8.6.2.4 Grupo electrógeno  $\cos \phi=0,5$ , RAS 4,6 kW / 8,5 kVA 400 V y Propulsor Novat 4 kW en vacío, como carga única**

Con el propulsor Novat girando en vacío, aparecen unos armónicos de alta frecuencia, en el entorno a los 1,8 kHz., además se observa acústicamente una oscilación torsional, que se analizará en Anexo 1.

### 8.6.2.5 Sistema (ACEE)

En los ensayos con el sistema (ACEE), con la frecuencia de conmutación ya mencionada de 8 kHz, desaparecen los armónicos de la onda de tensión, proveniente del generador quedando mucho más “limpia”. Esto es debido a los filtros de armónicos incorporados en los (VSD). Por el contrario, aparece la frecuencia de conmutación del (VSD) “Regen”. (6 kHz), Ver Fig. 123.

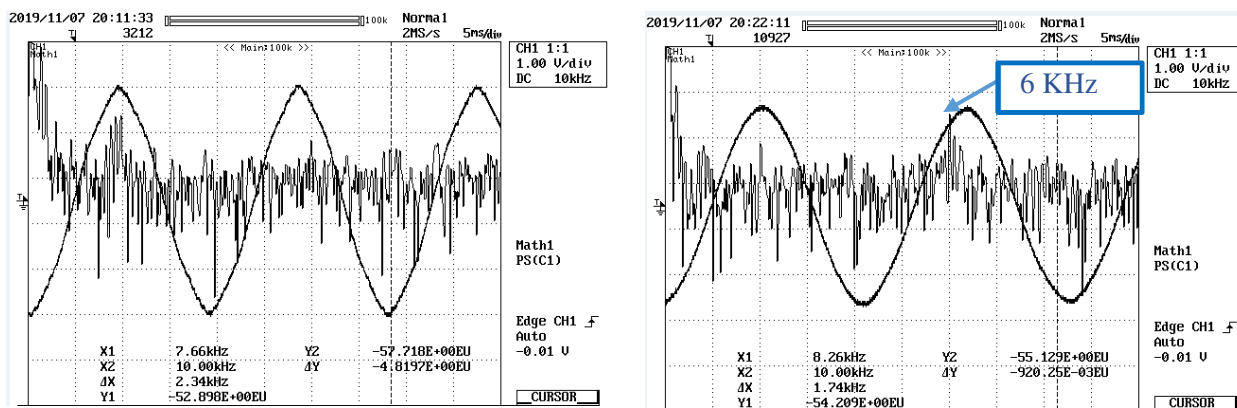


Fig. 123: Comparativa de contenido de armónicos de la tensión de red, estando el sistema (ACEE) desconectado (izquierda) y conectado (derecha). Fuente: Propia

### 8.6.2.6 Optimización de contenido de armónicos, mediante sistemas de frente activo (AFE) en convertidores de frecuencia

Los arranques progresivos con arrancador estático, o convertidor de frecuencia, encarecen el sistema y aunque limitan las corrientes de arranque, las deforman con armónicos, que requieren ser compensados con mayor corriente. También pueden desestabilizar la planta de generación eléctrica.

Los convertidores de frecuencia, siendo aún más caros, permiten la regulación de velocidad y la inversión de marcha, a costa de una mayor generación de armónicos, mayor tasa de distorsión armónica (THD). Estos armónicos, resultan perjudiciales para el resto de equipos instalados en esa red, consumiendo la corriente que le solicita la carga en el arranque, que puede llegar, en los convertidores de frecuencia de mercado, hasta el 150% / 200%  $I_N$ .

Existen costosas soluciones de frente activo (AFE) Fig. 124, de catálogo de 12 y 18 pulsos, que reducen fuertemente la generación de armónicos, los de 18 pulsos llega a reducir hasta el 5/6 % y los de 12 pulsos entre el 10/12 %. Estos convertidores de frecuencia, tienen el rectificador a base de transistores bipolares (IGBT) en lugar de diodos, lo que les permite generar una onda de intensidad senoidal casi pura,  $\cos \phi=1$

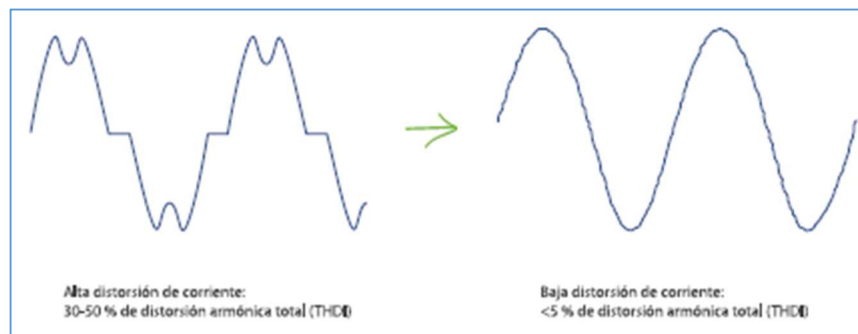


Fig. 124: Comparación de la forma de onda de tensión, con convertidor de frecuencia de 6 pulsos, std. y de 12 pulsos, frente activo: Fuente: Emotron AFE

## Mediciones experimentales

### 8.7 REFLEXIONES A PARTIR DE LOS ENSAYOS RAS+ACEE SOBRE LAS VARIABLES DE CONTROL DEL INICIO Y FINAL DE LA REGENERACIÓN DEL (ACEE)

Se pretenden determinar aquí, las variables óptimas y sus valores de umbral, para dar las órdenes de inicio y fin de la Regeneración. Esto ha de permitir desarrollar e instalarlas en los programas de Plc, adecuados a cada prueba.

Se han utilizado principalmente los dos grupos electrógenos de gasolina, ensayados en apartados anteriores, para alimentar cargas inductivas:

$\cos\phi=1$  (comercial): HONDA tiene un motor térmico de 6,4 kW y un alternador de 6,5 kVA,

$\cos\phi=0,5$  (grupo desarrollado específicamente para alimentar en permanencia , este factor de potencia, denominado RAS, tiene un motor térmico de 4,6 kW y un alternador de 8,5 kVA.

Se conectan los mismos motores de inducción, arrancando en vacío.

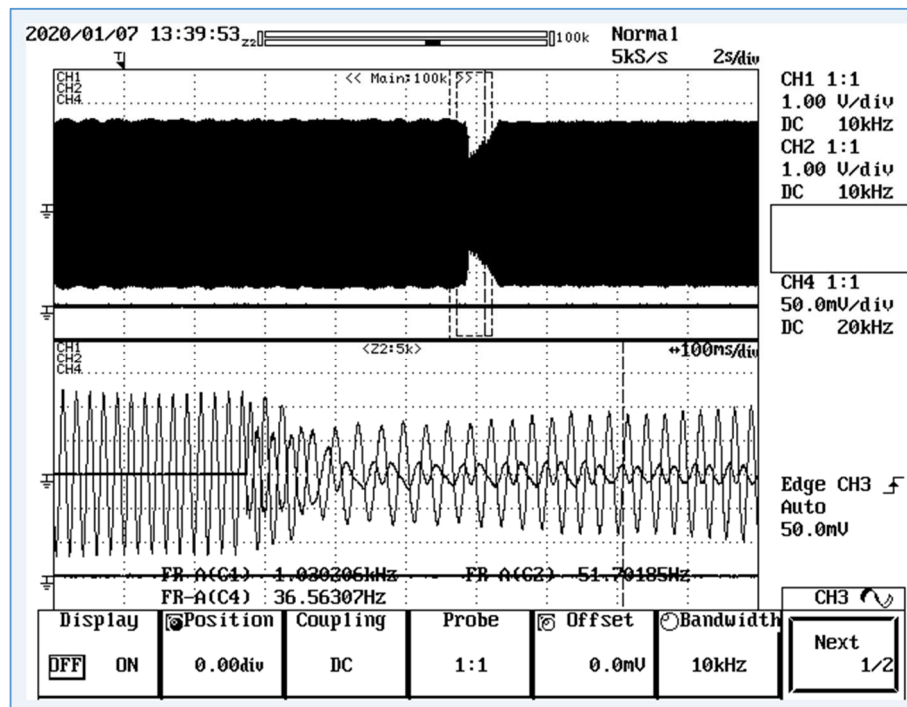
La variable de control, ha de ser fácil de medir y resultar significativa a la hora de disminuir el tiempo de respuesta del conjunto regulado. No siempre, las más fáciles de medir han resultado las mejores, para el control del conjunto.

### 8.7.1 Variación de la tensión de red alterna

Es la más fácil de medir, pues los transductores de tensión son simples, precisos y económicos.

Pueden colocarse en cualquier punto de la instalación, pues toda ella, está dimensionada para que las caídas de tensión sean poco significativas.

Se estudia el perfil de la caída de tensión del alternador, cuando se arranca en directo y en vacío, el propulsor “Novat” alimentado por el Grupo Electrónico “RAS” Fig.125.



**Fig. 125: Caída de la tensión del alternador, en el arranque en vacío del propulsor Novat desde el GE RAS, Huevo de tensión: profundidad: 50%, duración: 820 ms. Fuente: Propia**

La caída observada de la tensión del alternador debida a la conexión de la carga, se produce con un retardo medio de 40 a 80 ms, respecto al incremento de la intensidad de la carga, a este retraso se le ha de añadir el tiempo que requiere en alcanzar un valor significativo la descarga regenerativa, siendo el tiempo total de retraso desde 80 a 120 ms.

Las mejoras obtenidas con esta estrategia son, en tiempo de recuperación de la tensión del alternador del 45% y en cuanto a la profundidad del 35%.

Este retardo desaconseja utilizar el nivel de caída de la tensión de red como parámetro de control óptimo a monitorizar, aunque sea el más fácil de medir.



### 8.7.2 Variación de la corriente de la carga

Es más complicado de medir, pues los puntos de medida posibles en la instalación, se reducen al entorno de generación o carga.

Los transductores de corriente, suelen ser algo más complicados y caros.

Se monitoriza la corriente de carga en el arranque en vacío del propulsor Novat, alimentado por el grupo RAS. Para ello se introduce en el controlador la señal de corriente de carga, mediante la entrada analógica 1, del convertidor de frecuencia (VSD) “Motoring”, conjuntamente con la variable de rpm del motor. La estructura de programa específico de Plc, resulta ser similar al anterior, aunque tiene diferencias significativas.

En esta entrada analógica, que se refresca cada 250  $\mu$ s, se lee la corriente y se introduce en el parámetro (Pr.01.036). El umbral de la corriente de disparo, se varía mediante el parámetro (Pr.18.012) del (VSD) “Motoring”.

Hasta este momento, todos los parámetros chequeados para el disparo de la regeneración, inician la descarga regenerativa con un retardo en la ejecución de órdenes, que reducen parcialmente el efecto compensador del sistema acumulador (ACEE). La variable observada en registros de osciloscopio, que más rápidamente se ve afectada por el arranque directo del motor de inducción, es la corriente que absorbe la carga, cuyo efecto es inmediato y simultáneo, justo en el flanco del primer semiciclo (5 ms de retardo), sin embargo, se le ha de sumar el tiempo que requiere el Bus DC en alcanzar un valor significativo, esto se traduce en un retraso de reacción de disparo del sistema (ACEE), de unos 45 ms. al arranque del propulsor. Éste es, por ahora, el parámetro óptimo a seguir para el control Fig. 126.

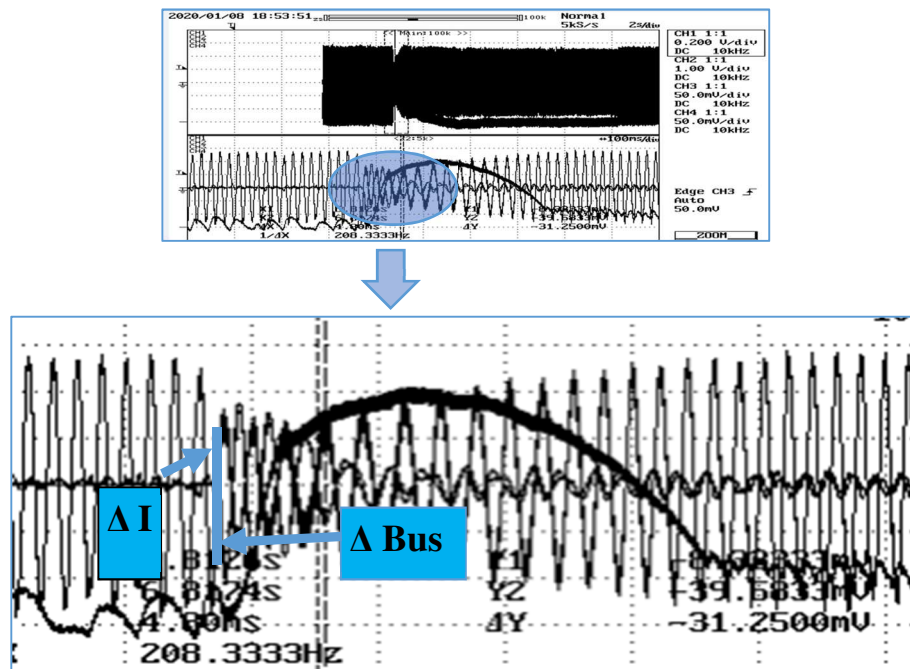


Fig. 126: Registro de Variación Intensidad del propulsor-carga y Caída de Tensión en el arranque directo en vacío, del propulsor Novat desde el grupo RAS  $\cos\phi=0,5$ . Fuente: Propia

Programando en el Plc, la descarga regenerativa por el incremento de la corriente de la carga, tal como vemos en la Fig. 126, se observa:

- Importante caída de tensión (50%).
- Importante caída de la frecuencia de red del grupo electrógeno RAS (40%).

Las mejoras obtenidas con esta estrategia son, en tiempo de recuperación de la tensión del alternador del 53% y en cuanto a la profundidad del 38%.

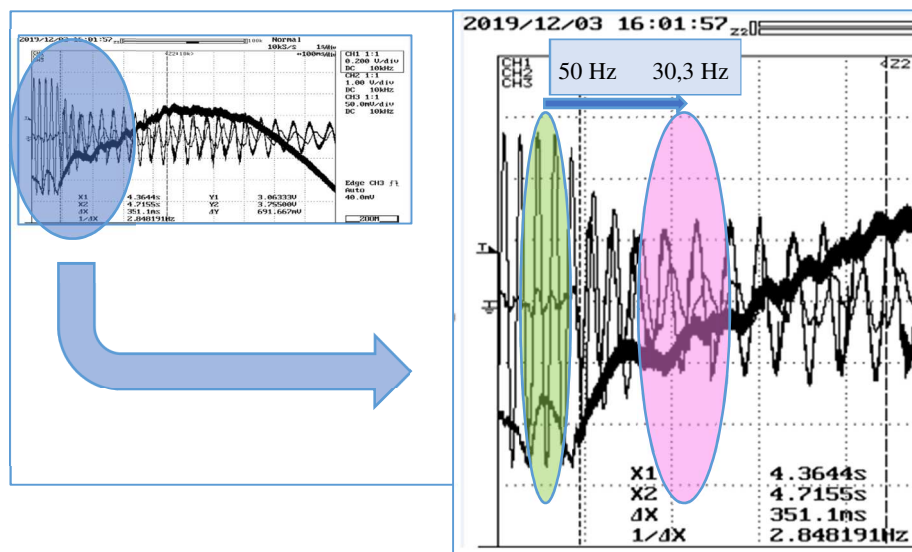
## Mediciones experimentales

### 8.7.3 Variación de la frecuencia de alimentación

Puede medirse en cualquier punto de la instalación.

Los transductores para determinar la frecuencia, suelen ser más caros y complejos, que los de tensión y corriente de una precisión comparable.

Cuando arranca directamente en vacío, el propulsor Novat alimentado por el grupo electrógeno RAS, además del hueco de tensión, disminuye también su frecuencia. Tal como se observa en Fig. 127, la variación va desde los 50 Hz iniciales del grupo electrógeno, hasta los 30,3 Hz de mínima frecuencia en el arranque en vacío.



**Fig. 127: Registro de Variación de la Frecuencia del alternador en el arranque en vacío del propulsor Novat alimentado del grupo RAS. Fuente: Propia**

Se desarrolla, igual que en el caso anterior, un programa de Plc similar, con lectura de la frecuencia de la red como parámetro de referencia, para iniciar la regeneración controlada.

La variación progresiva de la frecuencia, se produce también con retraso al hueco de tensión, de entre 60 y 100 ms. al arranque del propulsor. Se le ha de sumar el tiempo que requiere el Bus DC en alcanzar un valor significativo, esto se traduce en un retraso de reacción de disparo del sistema (ACEE), de entre 100 y 140 ms. al arranque del propulsor.

Este retraso, determinado experimentalmente, hace que tampoco pueda considerarse éste, el parámetro óptimo, que sirva al propósito de descargar la energía acumulada lo antes posible.

Las mejoras obtenidas con esta estrategia son, en tiempo de recuperación de la tensión del alternador del 40% y en cuanto a la profundidad del 36%.

No se aprecia una mejora significativa en el arranque del propulsor, al añadir el sistema (ACEE) con este tipo de control por frecuencia del generador.

#### 8.7.4 Variación de la tensión del Bus DC

Exige que el control del sistema, tenga acceso a los parámetros internos del (VSD). Esto no es siempre posible y puede generar conflictos de garantías, entre productos de diferentes empresas.

Se observa, que cuando se conecta cualquier tipo de carga al alternador del GE, estando el sistema (ACEE) conectado en paralelo, la tensión del alternador cae y esto hace aumentar automáticamente el voltaje del Bus DC de los VSD. El sistema (ACEE), intenta compensar de forma automática esta caída de tensión, aunque sólo esté “conectado” y “habilitado”, sin disparar la regeneración. Esta energía procede de los condensadores internos, de los convertidores de frecuencia (VSD) y del condensador añadido del sistema.

La regeneración, mediante el frenado regenerativo controlado del volante de inercia, a través del (VSD) “Motoring”, provoca un aumento de la tensión del Bus DC, que tiene un valor prefijado en reposo de 600 V. DC.

Este frenado mecánico convertido en energía eléctrica, comporta la inyección de corriente al alternador del grupo electrógeno y sus cargas.

### 8.7.5 Programa de Plc para descarga por nivel del Bus DC

Se ha implementado en el programa de Plc, que, a la caída de tensión del alternador, le corresponda automáticamente una descarga regenerativa, cuya respuesta se verá en los registros de osciloscopio, como una variación brusca del nivel del Bus DC.

Este automatismo, se ha implementado en un programa de Plc, hecho a medida para este propósito, en el propio convertidor de frecuencia (VSD), concretamente en el “Motoring”, en su memoria dedicada, “Plc on Board”.

Para el buen funcionamiento de esta variable, como parámetro que pueda disparar la regeneración, se requiere que se monitorice el valor del nivel de Bus DC, que es un parámetro interno del convertidor de frecuencia “Motoring” (Pr. 05.005) y que tiene valores que arrancan de 600V hasta los 830 V, valor de tensión, a partir del cual el convertidor de frecuencia genera una alarma, desconectándose para auto protegerse.

A tal fin, se utiliza una sonda diferencial divisora, con una reducción de 1:200, en lugar de un divisor de tensión. Se consigue un aislamiento galvánico adicional, imprescindible para el osciloscopio, cuyos canales son de “Modo Común”, compartiendo la misma masa de medida.

Este parámetro, que indica el nivel del Bus DC (Pr. 05.005), es de la tarea “Background”, con una actualización periódica cada 10 ms.

Durante estas pruebas, aparecieron problemas de compatibilidad electromagnética (EMC), en las comunicaciones entre los convertidores de frecuencia y el PC. Equipo desde el cual se registran los parámetros de control, usando las funciones disponibles de Data Logger y registro de osciloscopio de 8 canales.

La comunicación del PC, con los convertidores de frecuencia (VSD), se realiza mediante protocolo RS 485, mientras que la comunicación entre los convertidores de frecuencia (VSD), es del tipo Ethernet IP.

Para la solución de los problemas aparecidos, se apantalló el cable del Bus DC con film de aluminio, y se introdujo en un tubo metálico conductor / ferromagnético recubierto de plástico y puesto a masa. Además, se incrementó el nivel de apantallamiento de los cables de comunicación, cambiándolos por otros de nivel 7, (doble apantallamiento).

Adicionalmente y por consejo de los técnicos del fabricante de los convertidores de frecuencia, se bajó el tiempo de latencia de la entrada USB del PC a 1 ms. Con la incorporación de estos cambios, la comunicación mejoró significativamente.

El programa de Plc, en su inicio recoge mediante la tarea “Freewheeling”, los valores de los parámetros del convertidor de frecuencia “Motoring”, asignados al menú 18, menú dedicado

exclusivamente a almacenar datos de variables, a las que puede llamar el programa, pudiendo cambiar sus valores “on-line” desde el software “M-Connect” del PC.

Las variables, se han definido como “Globales”, a fin de poder ser utilizadas en cualquier tarea del programa. Las que requieren de una actualización rápida, se han añadido a la lista de “Fast Parameter List”.

Para este caso de disparo por nivel del “Bus DC”, se han utilizado tres variables auxiliares de estado, que son:

- Nivel de Bus DC.
- Referencia de par.
- Rpm del motor.

El programa de Plc, que da la orden de descarga de energía controlada por nivel del Bus DC. Se inicia con la lectura del Nivel de Bus DC y de rpm del motor. El programa impide la regeneración a menos que el volante de inercia haya alcanzado 1.500 rpm (aceleración positiva). En este punto inicia la monitorización del nivel de Bus DC. Cuando el nivel de tensión sobrepasa la referencia prefijada procede a la regeneración controlada, frenado del volante con aceleración negativa. Lee continuamente rpm del motor, hasta alcanzar una velocidad mínima prefijada. Momento en el cual se detiene el frenado y por tanto la regeneración, acelerando el volante de nuevo para llegar a la velocidad de régimen. Cuando llega a esa velocidad, queda listo para la próxima actuación.

## Mediciones experimentales

### 8.7.6 Verificación de la descarga por nivel de Bus DC, con grupo electrógeno $\cos\phi=0,5$ , RAS, 4,6 kW/8,5 kVA,

A fin de registrar los parámetros más relevantes de este tipo de descargas por Nivel del Bus DC, se procede al arranque en vacío del propulsor Novat con el grupo RAS, en tres conjuntos de lecturas diferentes. Se añade el sistema (ACEE) activo, habilitado en modo de control de Bus DC. El resumen de los resultados es, para el arranque del propulsor Novat, la respuesta registrada es la Fig. 128.

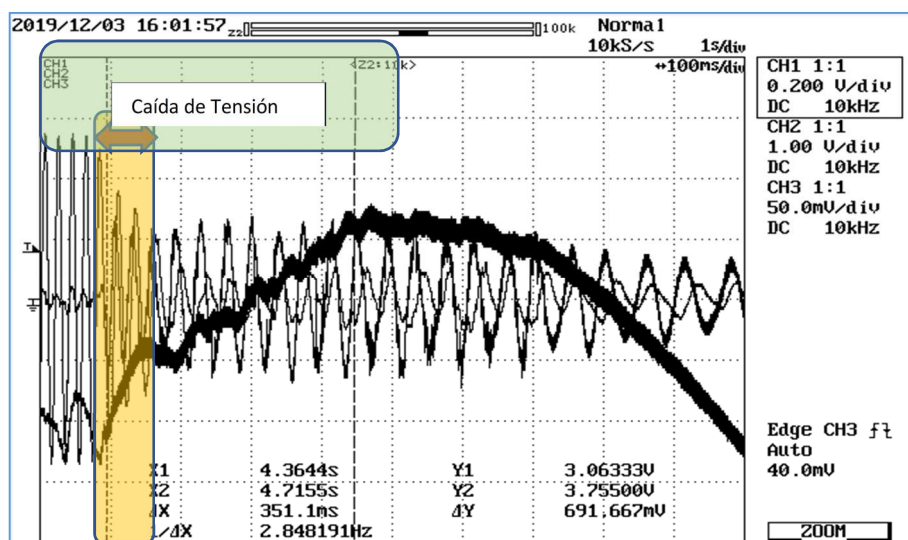


Fig. 128 Registro de Descarga Regenerativa, por incremento del nivel de Bus DC, caída de tensión y retraso de la descarga regenerativa, en relación al arranque de la carga. Fuente: Propia

- Tensión pk-pk desde 864 V hasta 431 V, caída de tensión del 50%.
- Tensión pk-pk desde 885 V hasta 462 V, caída de tensión del 48%.
- Tensión pk-pk desde 868 V a 424 V, caída de tensión del 51%

Se observa un retraso de más de 40 ms entre el arranque de la carga y el inicio de la descarga del sistema acumulador, sin embargo, se le ha de sumar el tiempo que requiere el Bus DC en alcanzar un valor significativo, esto se traduce en un retraso de reacción de disparo del sistema (ACEE), de unos 80 ms. al arranque del propulsor.

Los primeros ensayos con este programa de monitorización del Bus DC, se ajustaron para que la regeneración se iniciara cuando se sobrepasasen los 730V DC, con profundidad de regeneración hasta 600 rpm.

Como consecuencia del retardo en la descarga de energía con esta variable de control, se inicia una nueva experimentación, encaminada a mejorar la eficacia del sistema acumulador, buscando una respuesta más rápida del inicio de la regeneración. Se pretende mejorar la compensación del hueco de tensión y caída de frecuencia del alternador, pues se ha observado una mejora mediocre al añadir el sistema (ACEE).

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

La caída promedio de tensión del alternador es del 50% sin el sistema (ACEE)

Las mejoras obtenidas con esta estrategia son, en tiempo de recuperación de la tensión del alternador del 23% y en cuanto a la profundidad del 34%.



## 8.8 CONTROL ANTICIPATIVO

No siempre resulta posible y exige una determinada jerarquía en las órdenes, entre diferentes controladores y los (VSD) que controlan el (ACEE).

Se pretende compensar el retardo de actuación de los bucles de regulación, retardando la ejecución de la orden del arranque del propulsor, respecto al disparo de la regeneración del sistema (ACEE). A bordo resulta viable de instalar, con un simple retardo de la ejecución de la orden de arranque de los propulsores, que permita activar anticipadamente el sistema (ACEE). Para ello, se procede a la conexión de la carga, mediante un contactor de maniobra accionado por un pulsador. Se determina experimentalmente el tiempo de conexión de estos contactores, que oscila entre 50 y 90 ms.

Debido a la forma de la curva de descarga del Bus DC, que crece progresivamente con el tiempo, alcanzando su máximo entre 200 y 300 ms después de su inicio, la descarga regenerativa debe producirse antes del arranque del motor, para hacerlo coincidir con el máximo nivel de la descarga del sistema (ACEE).

Teniendo en cuenta lo anterior, se conectan las cargas manualmente, con anticipación a la descarga de energía, obteniendo un tiempo de recuperación de la red más corto y por tanto un sistema más eficaz.

Como resultado de lo descrito anteriormente, se evidencia en la Fig. 129, que el control óptimo de funcionamiento para el sistema acumulador cinético (ACEE), es en control anticipativo. Consiste en iniciar la descarga de energía del acumulador, antes que se produzca el arranque real del motor.

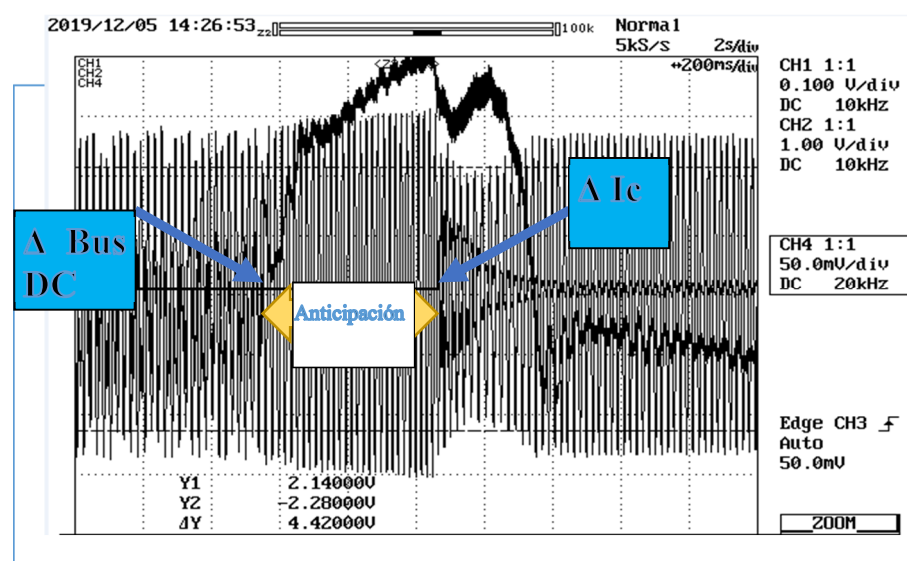


Fig. 129: Variación del nivel de Bus DC (energía a descargar), Tensión de alternador e Intensidad de la carga, en un arranque en vacío del propulsor ABB + Ventilador ABB en paralelo, desde el grupo RAS y con un control anticipativo de 500 ms. Fuente: Propia

Además, permite programar el retraso de conexión de las cargas, para buscar el tiempo óptimo. Esto se realiza mediante un interruptor de maniobra, que actúa directamente sobre una entrada del convertidor de frecuencia del “Motoring”.

Se introduce esta mejora a un nuevo programa de Plc, incorporado en los (VSD), adelantando siempre la orden de regeneración de energía a la red (orden de frenado regenerativo controlado), a la del arranque del motor de inducción, tal como se observa en la Fig,129.

Esta anticipación se puede variar a voluntad, programando un parámetro de almacenamiento del menú 18, tanto en el PC, como directamente en el teclado del convertidor de frecuencia.

En la Fig. 129 se puede observar, como aumenta el valor del voltaje del Bus DC (inyección de energía a la red), anticipadamente al arranque del motor, lo que le permite tener un nivel máximo de tensión en el momento del arranque de la carga, situación que ayuda a compensar más rápidamente el hueco de tensión provocado.

Como primera aproximación, se ensaya con un tiempo de anticipación de 500 ms, dejando para más adelante su optimización.

En la Fig. 130, además de definir el arranque con control anticipativo, se observan varios parámetros que serán motivo de registro sistemático, en todos los ensayos futuros y que conviene explicar:

- **Anticipación:** tiempo (ms.) de adelanto entre el inicio de la descarga regenerativa y el primer flanco de la corriente de arranque del motor eléctrico de inducción. (rojo)
- **Regeneración:** tiempo (ms.) que dura la descarga de energía del sistema (ACEE), representado por la gráfica del nivel de Bus DC. (verde)
- **Arranque:** tiempo (ms.) que dura el transitorio de la corriente de arranque de la carga hasta su estabilización.

## Mediciones experimentales

- **Recuperación tensión del alternador:** tiempo (ms.) que tarda en recuperarse la tensión del alternador (azul).

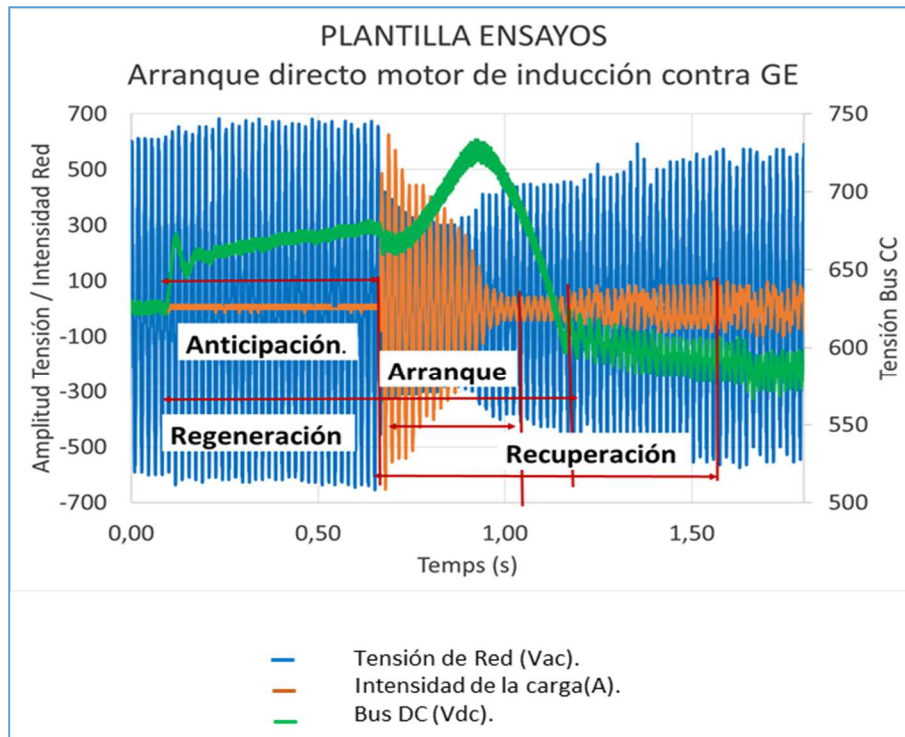


Fig. 130: Gráfico Patrón, para futuros registros de ensayos de arranque directo en vacío, anticipativos. Fuente: Propia

## 8.9 CONTROL DEL FINAL DE LA REGENERACIÓN

Para el estudio de la optimización del corte, es decir, del final de la regeneración, deben estudiarse varios elementos.

Se han analizado diferentes variables, para iniciar la descarga de la energía acumulada en el sistema (ACEE), a fin de recuperar de forma óptima, la tensión del alternador en el menor tiempo posible, estas variables han sido:

- Nivel de caída de tensión
- Variación de la Corriente de carga.
- Variación de la frecuencia de red.
- Nivel de Bus DC.

Concluyendo que, la variación de la corriente de la carga, es el parámetro más adecuado para el inicio de la descarga regenerativa, por tener un efecto simultaneo, a la caída de la tensión de la red. Sin embargo, la máxima eficacia del sistema (ACEE), se consigue con esta variable, pero anticipándose al arranque del motor.

La desaceleración del volante de inercia y en consecuencia el frenado regenerativo, se controla mediante la variación del valor de la pendiente de la rampa de velocidad durante el frenado de rotación. (% de frenado).

El programa, detiene la regeneración a una prefijada velocidad de giro, para iniciar la nueva carga del volante de inercia, mediante su aceleración y estabilización a 1.500 rpm. A esa ventana de velocidades, le llamaremos “Profundidad de Regeneración”.

Se ha de determinar, que variable es la más adecuada para detener la descarga, a fin de que, recuperando el sistema lo más rápidamente posible, pueda estar disponible para la siguiente regeneración.

La recuperación de la tensión del alternador, parece ser la variable más sólida desde el punto de vista práctico, ya que no tiene sentido seguir inyectando energía, si el sistema ya ha recuperado el valor nominal de la tensión y frecuencia. Si ya se ha recuperado el hueco de tensión, indica que se ha evitado la caída de planta, consiguiéndose el objetivo previsto en este trabajo, en que la carga arranca en vacío.

A estos efectos, se prepara otro nuevo programa de Plc, que lee el valor de la tensión del alternador, hasta que alcanza su valor nominal, momento en el que el programa detiene la regeneración. Se añade un offset de tensión, que facilita la comparación del valor leído con la consigna, (menú 18).

## Mediciones experimentales

La conclusión, sobre las ventajas de este sistema de finalización de la descarga, por recuperación de la tensión de red, son entre otras:

- Rendimiento, ya que consume el mínimo de energía para arrancar el propulsor, justo el necesario.
- Rapidez de la operación, mínimo tiempo hasta estar disponible para la siguiente descarga. Solo se bajan las revoluciones que son necesarias, para extraer la energía del propulsor.

Se han realizado ensayos y registros de arranques directos en vacío, del propulsor Novat 4 kW, para medir las variables asociadas y observar el buen funcionamiento del programa de Plc.

Las mejoras obtenidas con esta estrategia son, en tiempo de recuperación de la tensión del alternador del 60% y en cuanto a la profundidad del 43%, siendo los mejores resultados obtenidos.

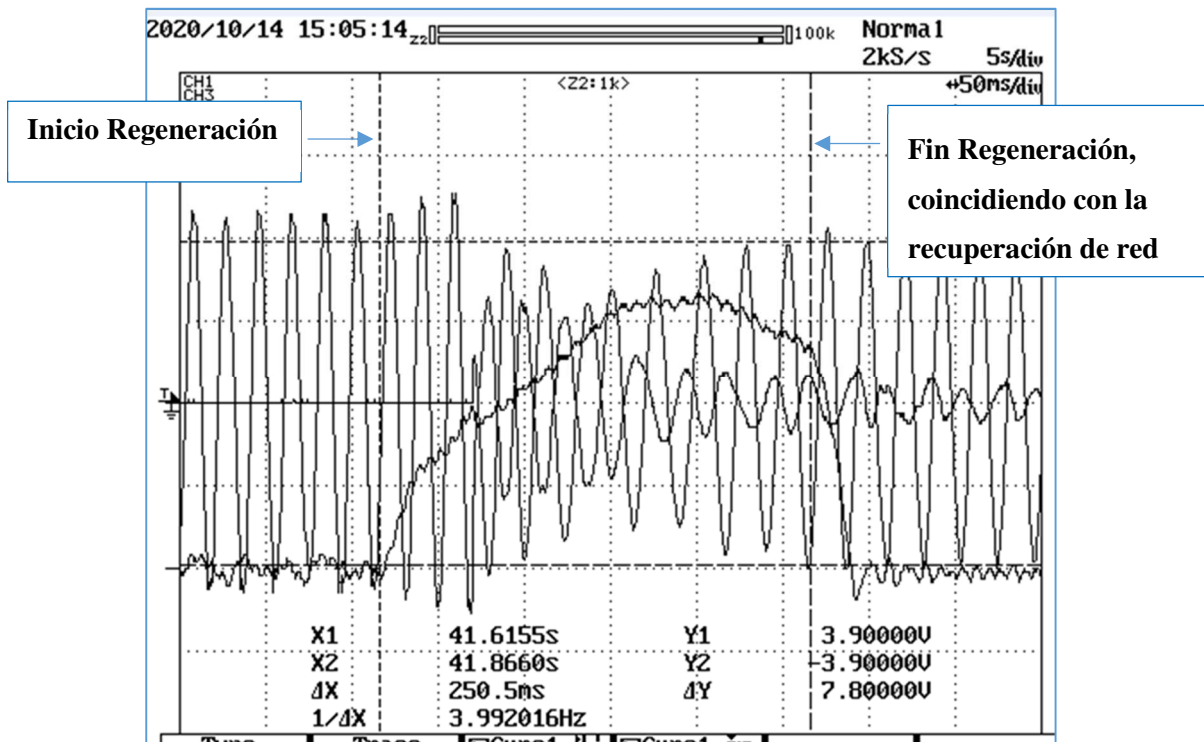


Fig. 131: Registro de osciloscopio, de la regeneración realizada con programa de Plc y corte a la recuperación de la tensión del alternador. Fuente: Propia

Se puede observar Fig. 131, como el fin de la Regeneración se produce bruscamente cuando la tensión ha recuperado el nivel original.

## 8.10 CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DE PLC, PARA AUTOMATIZACIÓN DE LOS ENSAYOS CON CONTROL ANTICIPATIVO

Se han configurado, las siguientes partes del programa de Plc interno de los convertidores de frecuencia (VSD), para el desarrollo y ejecución sistemática objetiva de los ensayos. Consistirán en controlar las descargas regenerativas, a fin de restablecer la tensión y frecuencia del alternador lo antes posible, después de haberse producido un fuerte hueco de tensión, debido al gran consumo de corriente, consecuencia del arranque directo en vacío de motores de inducción.

Se adaptan los parámetros internos del Plc integrado en el convertidor, a los valores hallados, como óptimos de la regeneración en modo de **Control Anticipativo**.

A continuación Fig. 132, 133, 134 y 135 se muestra el programa de Plc desarrollado a tal fin:

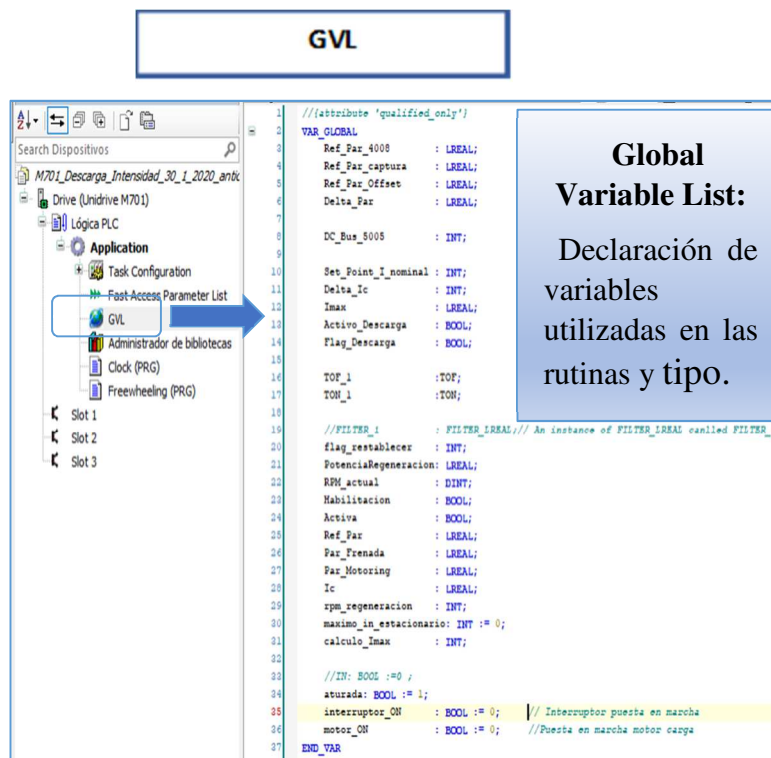


Fig. 132: Lista de variables globales del Control Anticipativo. Fuente: Propia

**Rutina "Clock"**

The image shows a screenshot of a PLC programming software interface. On the left is a project tree with folders like 'M701\_Descarga\_Intensidad\_30\_1\_2020\_anti', 'Drive (Unidrive M701)', and 'Lógica PLC'. The main window displays the 'PROGRAM Clock' routine with the following code:

```

1 PROGRAM Clock
2 //Variables lectura FAST
3 Ic := M01.P036_AnalogueRef1_RAW ;
4 RPM_actual := M05.P004 ;
5
6 //Aceleracion del volante de inercia
7 IF RPM_actual > 1450 THEN //-----
8   Activa := 1 ;
9 ELSIF RPM_actual < 1450 THEN //-----
10  Activa := 0 ;
11 END_IF
12
13
14
15 //monitorizacion de puesta en marcha carga
16 IF M18.P033 = 1 AND activa = 1 AND aturada = 1 THEN
17   Activo_Descarga := TRUE;
18 END_IF
19
20 //frenada por limite de velocidad
21 IF Activo_Descarga = TRUE AND RPM_actual < rpm_regeneracion THEN
22   Activo_Descarga := FALSE;
23 END_IF
24
25 //Proceso de Descarga de Energia Cinetica
26 IF Activo_Descarga = TRUE THEN
27   Ref_Par := - Par_Frenada ; //Par de Frenada
28 ELSE
29   Ref_Par := Par_Motoring ; //Par de recuperacion
30 END_IF
31
32 //Variables escritura
33 M04.P008_TorqueReference := Ref_Par ;

```

Four callout boxes provide explanations for specific code sections:

- Line 7-11:** "Acelera el sistema inercial con un par controlado hasta 1500 rpm y lo estabiliza, quedándose en stand-by." (Accelerates the inertial system with a controlled torque up to 1500 rpm and stabilizes it, remaining in stand-by.)
- Line 16-18:** "Activamos descarga cuando: Arrancamos el sistema (ACEE): aturada = 1 y Accionado interruptor arranque carga (M18.P033) = 1 y Sistema inercial a 1500 rpm activa = 1" (We activate discharge when: We start the system (ACEE): aturada = 1 and Start load switch (M18.P033) = 1 and Inertial system at 1500 rpm activa = 1)
- Line 21-23:** "Desactivamos descarga cuando: rpm (ACEE) bajan por debajo del límite prefijado de regeneración." (We deactivate discharge when: rpm (ACEE) drops below the predefined regeneration limit.)
- Line 27-30:** "Asignación de par: Par de Frenado: Ref\_Par= Par\_Frenada Par de Aceleración: Ref\_Par = Par\_Motoring" (Assignment of torque: Braking torque: Ref\_Par= Par\_Frenada Acceleration torque: Ref\_Par = Par\_Motoring)

Fig. 133: Rutina "Clock" del Control Anticipativo. Fuente: Propia



**Rutina “Freewheeling”**

The screenshot shows a PLC programming environment with the following components:

- Dispositivos:** Search Dispositivos, M701\_Descarga\_Intensidad\_30\_1\_2020\_antib, Drive (Unidrive M701)
- Lógica PLC:** Application, Task Configuration, Fast Access Parameter List, GVL, Administrador de bibliotecas, Clock (PRG), Freewheeling (PRG)
- Task Configuration:** Slot 1, Slot 2, Slot 3
- Code Editor:**

```

1 //Iniciación
2
3 M04.P010_TorqueOffsetSelect := 1 ; //Activa Torque Offset
4
5 //Variables lectura
6
7 //Datos de Ajuste
8 IF M18.P011 = 0 THEN M18.P011 := 0 ; END_IF
9 IF M18.P012 = 0 THEN M18.P012 := 3 ; END_IF
10 IF M18.P013 = 0 THEN M18.P013 := 20 ; END_IF
11 IF M18.P014 = 0 THEN M18.P014 := 8 ; END_IF
12 IF M18.P015 = 0 THEN M18.P015 := 600 ; END_IF
13
14 M18.P012 := MIN(MAX(M18.P012,0),100) ;
15
16
17 Far_Frenada := INT_TO_LREAL(M18.P013) ;
18 Far_Motoring := INT_TO_LREAL(M18.P014) ;
19 xpm_regeneracion := (M18.P015) ;
20 //interruptor_ON := (M18.P033) ;
21 //motor_ON := (M18.P032) ;
22 //M18.P032 := motor_ON ;
23
24
25 //puesta en marcha motor carga temporizado
26
27 TON_1(IN:= M18.P033,FT:=T#60MS,Q=>Habilitacion) ;
28
29 IF habilitacion = 1 THEN
30 M18.P032 := 1;
31 aturada :=0 ;
32
33 ELSE
34 M18.P032 := 0;
35 aturada :=1;
36 END_IF
37

```
- Callouts:**
  - Lines 8-12:** Inicialización de parámetros modificables por el usuario.
  - Lines 17-22:** Asignación de variables según parámetros.
  - Lines 27-31:** Temporización y habilitación puesta en marcha carga.
  - Lines 32-36:** Si no se cumple la condición de temporización, no se permite la puesta en marcha de la carga.

Fig. 134: Rutina “Freewheeling” del Control Anticipativo. Fuente: Propia



**Parámetros de Acceso Rápido**

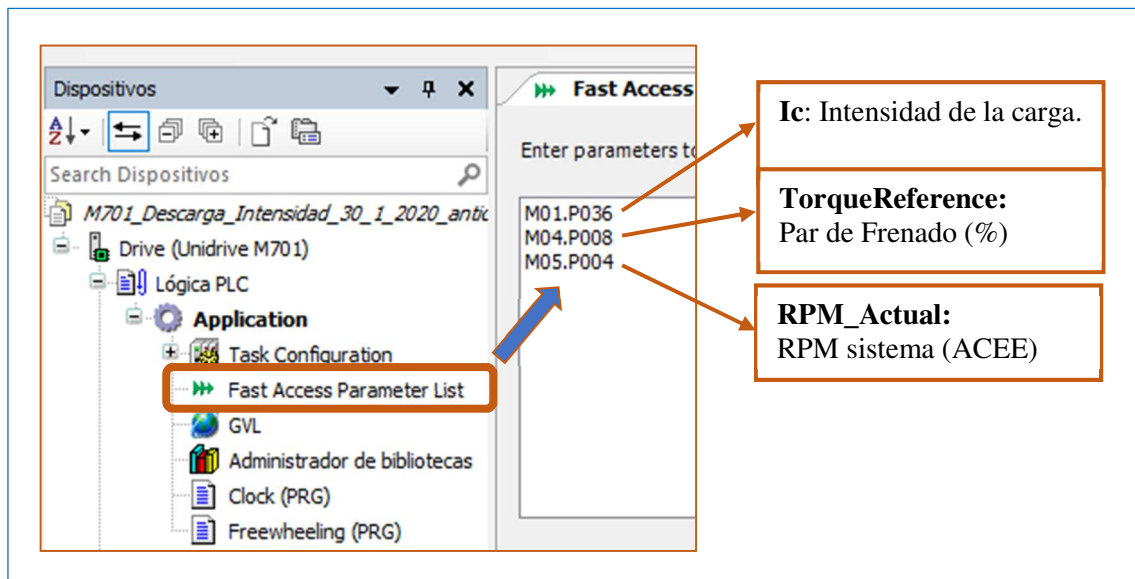


Fig. 135: Parámetros de acceso rápido del Control Anticipativo. Fuente: Propia

Como comentario adicional, destacar que los valores de:

- rpm final regeneración (M18.P015).
- Par de frenado regenerativo (M18.P013).
- Par de aceleración sistema inercial (M18.P014).

residentes en el menú 18, pueden ser modificados por el operador desde el programa de PC “MConnect” o mediante el teclado del (VSD) “Motoring”, donde también reside el mismo programa de Plc.

Con esta estructura de programa y variables, ajustada a cada tipología de ensayo (Proyecto), se han realizado la mayoría de las pruebas, de forma repetitiva y sistemática, para dar validez estadística a los resultados.

### 8.11 FUNCIÓN REGENERATIVA, OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA TENSIÓN Y FRECUENCIA DEL ALTERNADOR

Partiendo de la base, de que la energía acumulada es energía cinética y depende exclusivamente de la inercia y al cuadrado de la velocidad de rotación del volante de inercia, el siguiente paso será determinar los parámetros propios de control óptimo de la función regenerativa, para la más rápida recuperación de la tensión y frecuencia del alternador. Al estar el propulsor en vacío, la frecuencia se recuperará rápidamente.

Después del estudio detallado de los parámetros disponibles de los convertidores de frecuencia (VSD) y del análisis de las pruebas efectuadas, se concluye que los parámetros más influyentes en la eficacia de la regeneración, son los que se presentan a continuación:

- Porcentaje del par de Frenado Regenerativo (%).
- Profundidad del Frenado regenerativo (rpm).
- Anticipación del frenado regenerativo (ms.) con respecto al arranque del motor, generando un incremento de la tensión del Bus DC. Estos parámetros, se detallan a continuación:

## 8.12 INFLUENCIA DEL PAR DE FRENADO REGENERATIVO

Se realiza un conjunto de pruebas de arranques directos en vacío, del motor Novat, alimentado por el grupo electrógeno  $\cos \phi=1$ , "HONDA" 6,4 kW-6,5 kVA.

Sin el sistema (ACEE) conectado, este GE entra en Blackout, en dos de cada diez arranques.

Se comparan los resultados obtenidos en los arranques directos del motor Novat de 4 kW, con el sistema (ACEE) conectado, para relacionar la energía aportada por el (ACEE). Esta depende del % del par de frenado regenerativo, y afecta al tiempo de recuperación de la tensión y la frecuencia de red.

El % del par de frenado, define la pendiente de la rampa de desaceleración del volante de inercia, y por tanto el tiempo en el cual se transforma la energía cinética acumulada, en energía eléctrica, en forma de potencia instantánea eléctrica. Esta potencia restablece la tensión y frecuencia de red a sus condiciones iniciales.

**Tabla 26 Datos arranque directo en vacío, propulsor Novat con el grupo electrógeno HONDA 6,4 kW- 6,5 kVA,  $\cos \phi=1$  conectado, para gráfico Fig. 125, con 10% de par de frenado vs. tiempo de recuperación del sistema ms.**

<b>Par de Frenado 10%</b>			
<b>Profundidad de la Regeneración rpm</b>	<b>Nivel Bus DC V</b>	<b>ms Recuperacion al 10%</b>	<b>Potencia VA instantanea absorbida/10</b>
1375	823	429	1679
1250	710	358	1819
1100	800	467	2228
1000	699	360	1636
800	799	450	1791
600	811	430	1583
300	704	400	1812
100	715	424	1355
<b>Promedio</b>	<b>758</b>	<b>415</b>	<b>1754</b>

Tabla 27 Datos arranque directo en vacío, propulsor Novat con el grupo electrógeno HONDA 6,4 kW-6,5 kVA,  $\cos \phi=1$ , para gráfico Fig. 125, con 19% de par de frenado vs. tiempo de recuperación del sistema ms.

<b>Par de Frenado 19%</b>				
<b>Profundidad de la Regeneración rpm</b>	<b>Nivel Bus DC V</b>	<b>ms Recuperacion</b>	<b>ms Regeneración</b>	<b>Potencia VA instantanea absorbida/10</b>
1375	800	359	359	1861
1250	754	374	354	1868
1100	728	350	320	1832
1000	798	366	346	1938
800	738	350	350	1527
600	752	382	382	1774
300	733	330	304	1810
<b>Promedio</b>	<b>758</b>	<b>359</b>	<b>345</b>	<b>1802</b>
<b>Comparativa 19%/10</b>	<b>0%</b>	<b>-13%</b>	<b>-80%</b>	<b>3%</b>

En base a estos datos, se han construido las gráficas que se muestran en Fig. 136:

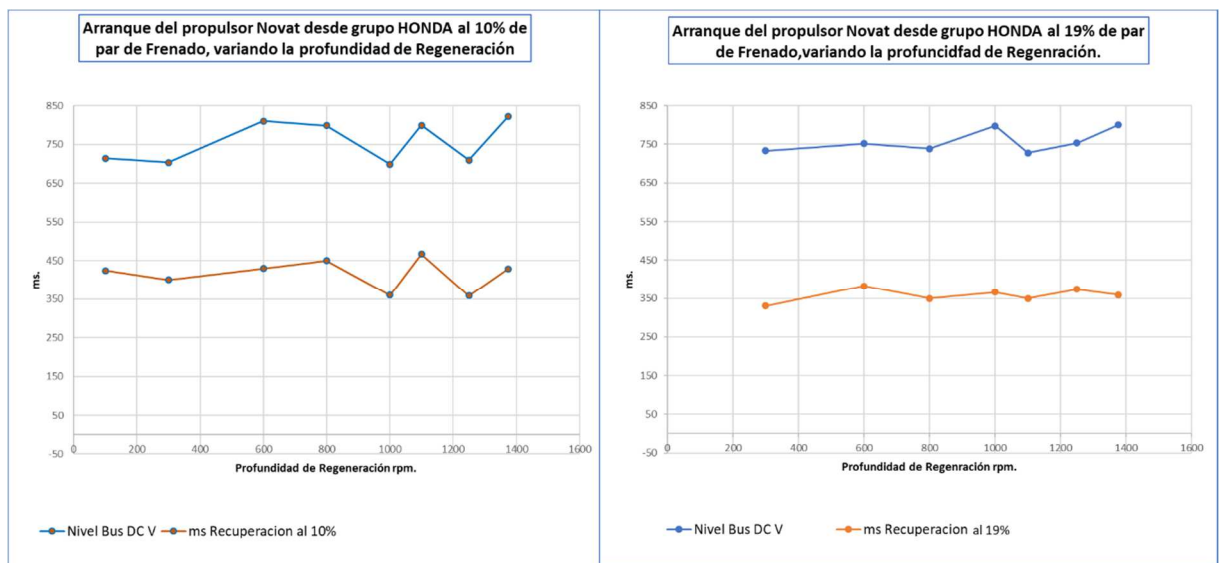


Fig. 136: Dependencia del Nivel de Bus DC, tiempo de recuperación y potencia instantánea absorbida vs. % par de frenado. Fuente: Propia

Se observa Fig. 136 que:

- El tiempo de recuperación de la tensión del alternador, es dependiente del % de par de frenado, el tiempo de recuperación promedio en el caso del 10% es de 415 ms y con el 19% es de 359 ms (-13%). Por tanto, **a mayor par de frenado, más rápida es la descarga en forma de corriente y por tanto la tensión y frecuencia se recuperan antes.**

A mayor porcentaje del par de frenado, más rápida es la descarga de la energía almacenada en el volante de inercia. Es decir que define la pendiente de la rampa de frenado.

### Mediciones experimentales

Aunque en este rango de 10% y 19% de par de frenado, el nivel de Bus DC permanece constante, a partir del 20% resulta crítico aumentar el % de frenado. En pruebas por encima de este valor, se alcanza el nivel de disparo por sobretensión en el Bus DC del sistema, que está situado en el umbral de los 830V.

### 8.12.1 Energía generada.

A fin de poder medir en cada descarga, la energía regenerada en el sistema, se aprovecha la función osciloscopio que nos ofrece el software del fabricante de los convertidores de frecuencia (VSD) “CT Sope”, que se procesa en PC. Se muestra una gráfica relevante en Fig. 137:



Fig. 137: Imagen de registro de descarga de energía del volante de inercia y recuperación del sistema (ACEE). CT Scope. Fuente: Propia

En esta gráfica:

- Trazo verde, representa la evolución de la velocidad del volante en rpm del motor acumulador cinético.
- Trazo rojo, potencia instantánea entregada por el sistema (ACEE).
- Área del trapecio en rojo, es la energía instantánea entregada en la descarga.

Con esta herramienta interna del (VSD), se calcula en cada registro la energía regenerada, midiendo el área (trapecio o triángulo, según el caso, potencia instantánea vs tiempo).

Se aprecian dos conclusiones:

- La energía generada se mantiene constante y no depende del % del par de frenado aplicado. El área del trapecio o del triángulo, según el caso, es siempre la misma y depende exclusivamente de la energía cinética acumulada en el volante de inercia.

## Mediciones experimentales

- El pico de potencia transferido por el sistema (ACEE), es mayor, a mayor porcentaje del par de frenado aplicado, resultando especialmente clarificador la Fig. 138:

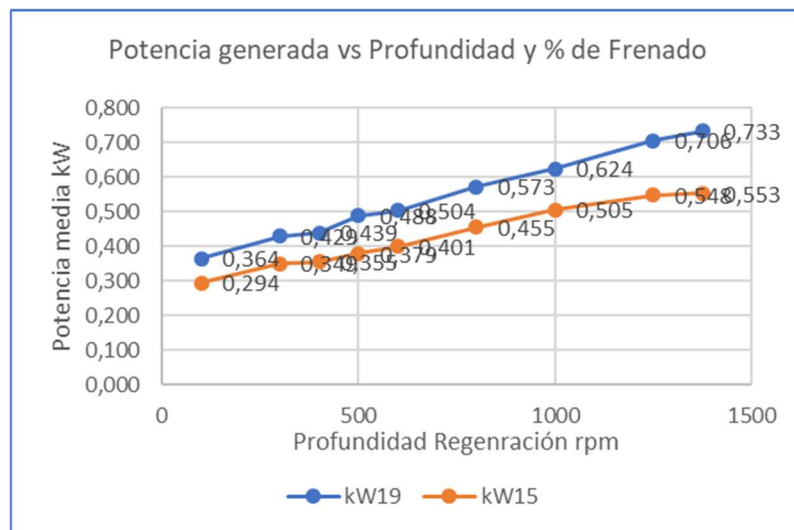


Fig. 138: Potencia generada kW vs. Profundidad de Regeneración rpm. Fuente: Propia

- A mayor par de frenado, la Potencia generada es mayor en todo el rango de profundidades de regeneración.

Además, la relación entre la duración de la Regeneración y los kWh de energía regenerada a diferentes % de frenado (independiente del % de frenado), se observa en la Fig. 139:

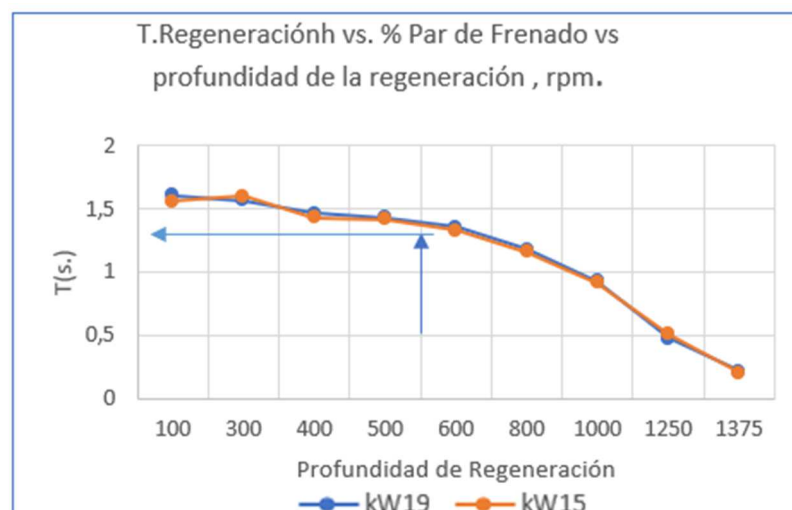


Fig. 139: Gráfico Tiempo de Regeneración vs. % par de frenado vs. profundidad de la regeneración. Fuente: Propia

- La duración de la Regeneración, depende mucho de la profundidad de frenado que apliquemos al proceso.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

- A partir de 600 rpm, el incremento del tiempo de regeneración deja de ser lineal, para pasar a ser una curva debido que los niveles de energía a altas rpm, son mucho mayores, que a bajas rpm (varía en función del cuadrado de la velocidad). La energía acumulada es tan pequeña, por debajo de 600 rpm, que no hay variación significativa en la duración de la regeneración.

En este caso en el entorno del 550 rpm de profundidad en la regeneración, se encuentra el máximo de la duración de la regeneración, mostrando una línea curva a partir de este punto. Esto es debido a que, aunque el sistema acumulador siga frenando, ya se ha descargado toda la energía del volante de inercia y no puede dar más.

### 8.12.2 Influencia de la profundidad (rpm) y duración de la Regeneración

La función de un sistema de acumulación de energía, es evitar que la tensión y frecuencia del alternador caigan por debajo de valores, que puedan desconectar cargas, entre otros efectos.

Habiendo evitado la caída de planta, la siguiente misión es optimizar la recuperación del sistema, entendido como el tiempo que tarda la tensión y frecuencia del alternador en volver al nivel de origen.

Se observa a continuación Fig.140, la influencia de la profundidad de la regeneración, en la duración del proceso de descarga regenerativa:

Tabla 28 Datos Profundidad de Regeneración vs Duración Descarga.

Profundidad de Regeneración rpm.	Duración de Descarga ms.
300	460
600	265
1000	125

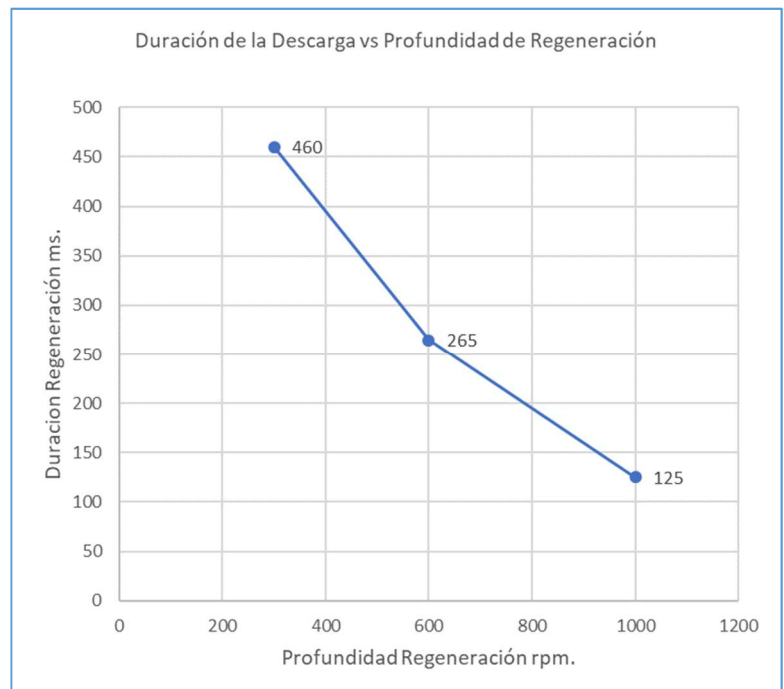


Fig. 140: Duración Regeneración vs de Profundidad de Regeneración. Fuente: Propia



### Mediciones experimentales

El tiempo de regeneración, vendrá determinado por el tiempo en el que el alternador recupera los valores iniciales de tensión y frecuencia. A partir de este instante, no tiene utilidad seguir descargando energía.

Debe entenderse, que detener la regeneración a 1.000 rpm desde 1.500 rpm, es una menor profundidad que detenerla a 600 rpm desde 1.500 rpm.

Puede concluirse que:

- A mayor profundidad de regeneración mayor tiempo de descarga, es una función gobernada por la pendiente de la rampa de frenado.

### 8.12.3 Duración de regeneración del (ACEE) vs. frecuencia del alternador sin carga.

A fin de verificar que la descarga de energía del sistema (ACEE), no pueda dañar al grupo electrógeno, se ha procedido a ensayar, antes de la conexión de cargas, la relación de la duración de la Regeneración, con la variación de la frecuencia del alternador.

Partiendo de la frecuencia inicial del grupo electrógeno de 50/51 Hz, durante el proceso de descarga de energía, se observa Fig.141:

- Un incremento en la frecuencia del alternador, indica que éste ha recibido energía desde una fuente externa.
- Durante la regeneración, la frecuencia del alternador aumenta hasta un máximo de 60 Hz a los 900 ms, para decrecer progresivamente con el tiempo hasta su estabilización.

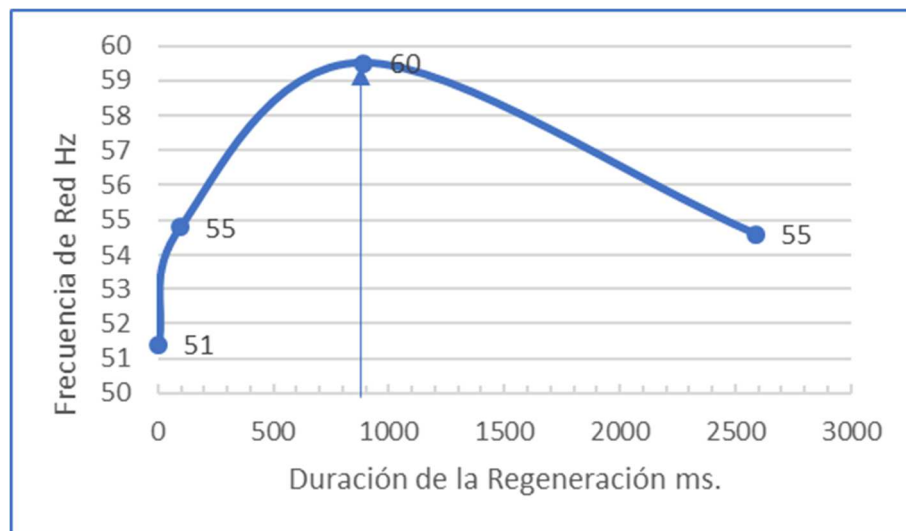


Fig. 141: Influencia en la Frecuencia de red, de la duración de la Regeneración.  
Fuente: Propia

Se concluye que la afectación más importante de la frecuencia del alternador para este equipo y ensayo, se produce a los 900 ms. de duración de la regeneración.

### 8.13 INFLUENCIA DE LA ANTICIPACIÓN DE LA DESCARGA REGENERATIVA

Repetimos aquí en la Fig. 142, la imagen del sistema anticipativo, para mostrar el registro del arranque directo en vacío del propulsor Novat, alimentado por el grupo electrógeno “RAS, y sistema (ACEE) conectado con un programa de Plc anticipativo de 600 ms. En el registro la envolvente de la tensión del alternador está en azul, el nivel de Bus DC en verde y la de la corriente de carga en rojo.

Es destacable el fenómeno de la sobretensión que aparece en el alternador, en cuanto se habilita el sistema (ACEE), que puede llegar a ser hasta del +20% del nominal.

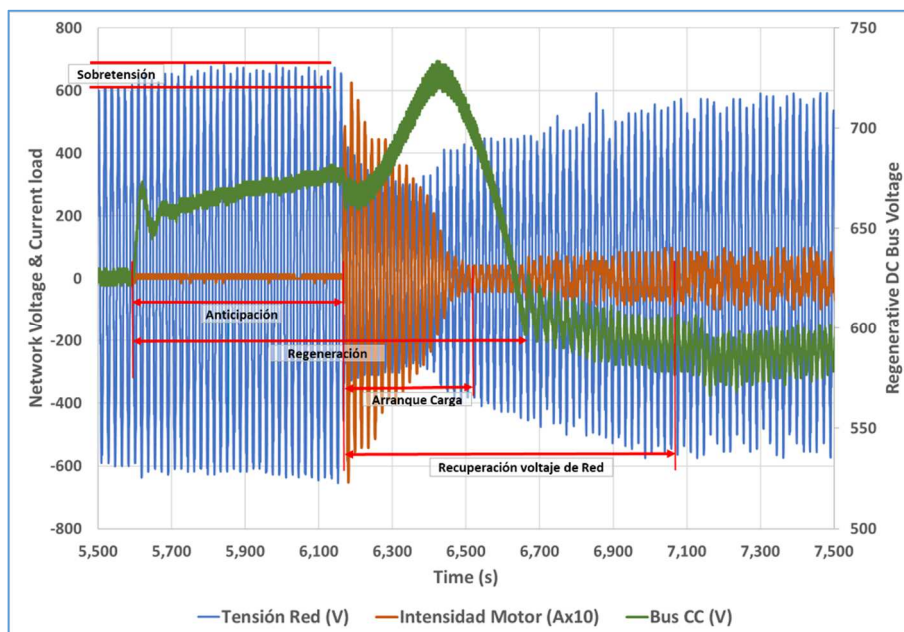
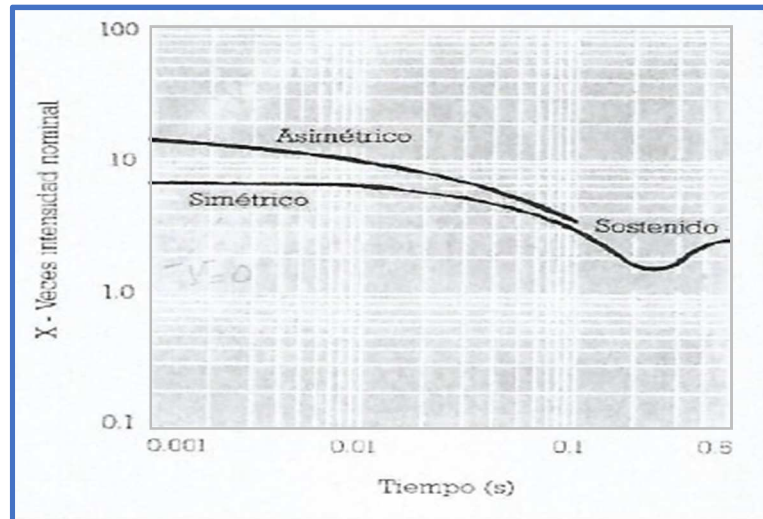


Fig. 142: Registro de Arranque directo en vacío, del propulsor Novat desde grupo electrógeno RAS, con sistema (ACEE) anticipativo 600 ms. Fuente: Propia

Cabe destacar, que el tiempo total de la anticipación, viene fijado por la suma del tiempo de anticipación programado en el Plc, más el tiempo que los contactores necesitan para cerrar el circuito de alimentación del motor, que se sitúa alrededor de los 75 ms.

Se observa, además la sobretensión del alternador, antes de que se produzca su caída, como consecuencia de la puesta en marcha del sistema de regeneración. Puede considerarse esta sobretensión una ventaja añadida e importante del sistema de regeneración anticipativo controlado, siempre que sea de magnitud admisible.

El sistema de regulación de tensión automática (AVR), tiene un retardo de unos 100 ms. desde el inicio de la circulación de corriente hacia la carga. Para compensar la caída de tensión, producida por el arranque directo de un motor de inducción, debe variarse la corriente de excitación y el sistema de regulación, tarda ese tiempo en reaccionar Fig. 143.



**Fig. 143: Retardo de actuación del sistema (AVR) en un alternador síncrono 100 kVA.**  
Fuente: Ricard Bosch-Tous, “Cargas dinámicas en Grupos Electrógenos de Emergencia

La regeneración anticipativa compensa estos efectos de retardo, asegurándonos de que hay una inyección de energía a la red de alimentación de la carga, incluso antes de producirse el arranque del propulsor y la actuación del sistema (AVR).

Para determinar el tiempo óptimo de anticipación, que se produce cuando al arrancar la carga coincide con el máximo de energía regenerada disponible en el (ACEE), se realiza un conjunto de ensayos cuyos resultados se muestran en la tabla 29.

Estos ensayos, corresponden a arranques directos en vacío del propulsor “Novat” alimentado por el grupo  $\cos \phi=0,5$ , “RAS” 4,6 kW-8,5 kVA, CON y SIN el sistema (ACEE), con un par de frenado del 20%, con profundidades de regeneración de 1.000 rpm y 1.250 rpm y con diferentes tiempos programados de anticipación.

## Mediciones experimentales

**Tabla 29 Ensayos de arranques de motor Novat alimentado por grupo RAS, SIN (ACEE) y CON (ACEE) con 20% de par de frenado, para optimizar el tiempo de anticipación de la descarga y su influencia en la mejora del hueco de tensión.**

Par de Frenado (%)	Profund. Regen. (rpm)	Retardo conexión carga programa (ms)	Retardo conexión Contactor (ms)	Retardo real conexión carga Prog.+Cont. (ms)	Caída Tensión $\Delta V$ (%)	Tiempo Recuperac. Tensión red (ms)	Tiempo Arranque Carga (ms)
SIN (ACEE)	NA	NA	NA	NA	52	1295	292
SIN (ACEE)	NA	NA	NA	NA	56	1340	321
SIN (ACEE)	NA	NA	NA	NA	56	1390	320
20%	1000	60	75	135	37	700	250
20%	1000	60	71	131	45	700	285
20%	1000	0	35	35			
20%	1000	0	57	57	47	677	285
20%	1000	0	35	35	49	718	277
20%	1000	120	93	213	46	580	278
20%	1000	120	37	157	45	610	321
20%	1000	240	116	356	46	671	285
20%	1000	240	50	290	44	715	275
20%	1250	60	82	142	47	615	270
20%	1250	60	82	142	47	635	205
20%	1250	60	34	94	47	547	207

Nota: Con fondo rojo los peores resultados obtenidos y con fondo verde los óptimos.

Principales efectos observados:

- Desde el inicio del proceso de regeneración del sistema acumulador, se produce un incremento de la tensión de red del orden del 15% al 20%. Este fenómeno de sobretensión aparece solo en cuanto se habilita el sistema (ACEE).
- En el caso de no intervención del sistema acumulador (ACEE), las caídas de tensión del alternador son máximas y del orden del **54%**, mientras que, con el sistema acumulador conectado, la caída media es del 45%, (-15%), siendo la tensión mínima mayor, debido al aumento inicial de la misma provocado por el sistema acumulador. Mejora pues un +32%.
- El tiempo de recuperación de la tensión y frecuencia del alternador sin intervención del sistema acumulador, es el peor de la serie de pruebas, alcanzando valores que superan los

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

1.300 ms, mientras que con sistema acumulador (ACEE) está en el entorno de los 650 ms.

**Mejora pues, un 50% en tiempo.**

- La menor caída de tensión se produce con 135 ms. de anticipación (60 ms de anticipación programada+ 75 ms de retardo en la maniobra de cierre de contactor).
- La recuperación de la tensión y frecuencia del alternador más rápida, que es de 547 ms., se produce con 1.250 rpm de profundidad de regeneración y 94 ms. de anticipación (60 ms programa + 34 ms contactor).
- El tiempo de arranque de la carga inductiva en vacío (Motor Novat), es independiente de la existencia o no del sistema acumulador, no así su estabilización.

**Se confirma así, que el mejor sistema es el anticipativo y su valor óptimo de anticipación real, está en este caso y ensayo, en el entorno entre 90 y 140 ms. total (60 ms anticipación + tiempo respuesta contactores)**

## 8.14 CONCLUSIONES DE LA EXPERIMENTACIÓN CON (ACEE), 7,4 kJ/25 A

### 8.14.1 Resultados de las mejoras con el sistema (ACEE), 7,4 kJ/25 A

La variación de tensión y de corriente, consecuencia del arranque de un motor de 4 kW, 400V, alimentado de un alternador comercial sobredimensionado con  $\cos \varphi=0,5$  y del mismo apoyado del sistema (ACEE) mejora sustancialmente:

- Profundidad del hueco de tensión del 60% con alternador comercial, 50% con alternador sobredimensionado y del 43% si además reforzamos con el sistema (ACEE)
- Duración del hueco de tensión de 1.530 ms. en el caso de alternador comercial, de 840 ms. con el alternador sobredimensionado y de 320 ms. con el sistema (ACEE) de apoyo.

Tenemos la certeza experimental de la utilidad y eficacia del sistema (ACEE), para mejorar sustancialmente los huecos de tensión y frecuencia, provocados por el arranque de grandes cargas inductivas. Se muestra como una herramienta real, para solucionar problemas de inestabilidad debidos a huecos de tensión y frecuencia.

Se han ensayado experimentalmente diversas las estrategias de control del inicio y finalización de la regeneración, llegando a las conclusiones que se muestran en la Tabla 31:

**Tabla 30 Mejoras que aporta el sistema (ACEE) a los huecos de tensión del alternador, provocados por el arranque directo y en vacío, de un motor de inducción 4 kW alimentado de GE,  $\cos \varphi =0,5$ , RAS 4,6 kW-8,5 KVA**

Arranque motor Novat 4 kW, GE $\cos \varphi=0,5$ , RAS 4,6 kW/8,5 kVA, con sistema (ACEE)	Mejora tiempo estabilización de la tensión vs arranque directo (%)	Mejora hueco (profundidad) de tensión vs arranque directo (%)	Retraso descarga regenerativa útil (ms)
$\Delta$ Tensión de línea	45	37	80 ÷ 120
$\Delta$ Corriente de carga	53	38	45
$\Delta$ Frecuencia	40	36	100 ÷ 140
$\Delta$ Bus DC	23	34	80
<b>Anticipativo (60 ms)</b>	<b>60</b>	<b>43</b>	<b>0</b>

Se concluye que la estrategia óptima del arranque de la carga es la anticipativa.

Se sabe por experimentación, que cualquier estrategia de disparo de la regeneración que se base en alguna variable interna del Plc, tiene un retraso mínimo de 45 ms., al momento del arranque real de la carga, no aportando energía adicional al arranque de la carga. Con un sistema “anticipativo” programable, se puede hacer coincidir el arranque de la carga con el máximo de energía proporcionado por el volante de inercia, representado por el Bus DC.

Las variables que más afectan a la efectividad de la descarga regenerativa del sistema (ACEE) y que se deben ajustar en cada aplicación son:

- **El porcentaje de frenado.**
- **La profundidad de la regeneración.**
- **El tiempo de anticipación.**

Resumiendo, el sistema (ACEE) es un sistema eficaz, para mejorar la estabilidad de las plantas eléctrica a bordo. Es escalable en potencia desde vatios a MW, es de fácil ubicación, compacto, con capacidad de repetibilidad, robusto, de muy bajo mantenimiento y ajustable a cada aplicación.

La aplicación concreta, así como el dimensionado del sistema (ACEE), requiere de personal experto.

La instalación de un sistema (ACEE) puede llegar a comportar un ahorro de consumo de combustible, toda vez que en ocasiones puede reducirse el tamaño de la maquina térmica.

A diferencia de las baterías, no requiere de salas especiales habilitadas para ubicarse.

Su inconveniente es el coste que alcanza la proporción de 10:1, comparado con el sobredimensionado del alternador que, de ser viable, es la mejor de las soluciones para disponer de potencia instantánea transitoria y de energía reactiva suficiente y controlada, para el arranque directo de grandes motores de inducción, sin necesidad de mayores ajustes.

El (ACEE) puede ser un complemento interesante para la navegación de buques Diesel-Eléctricos con mal tiempo. Este estudio queda fuera alcance de la presente tesis.



## 9 CONCLUSIONES

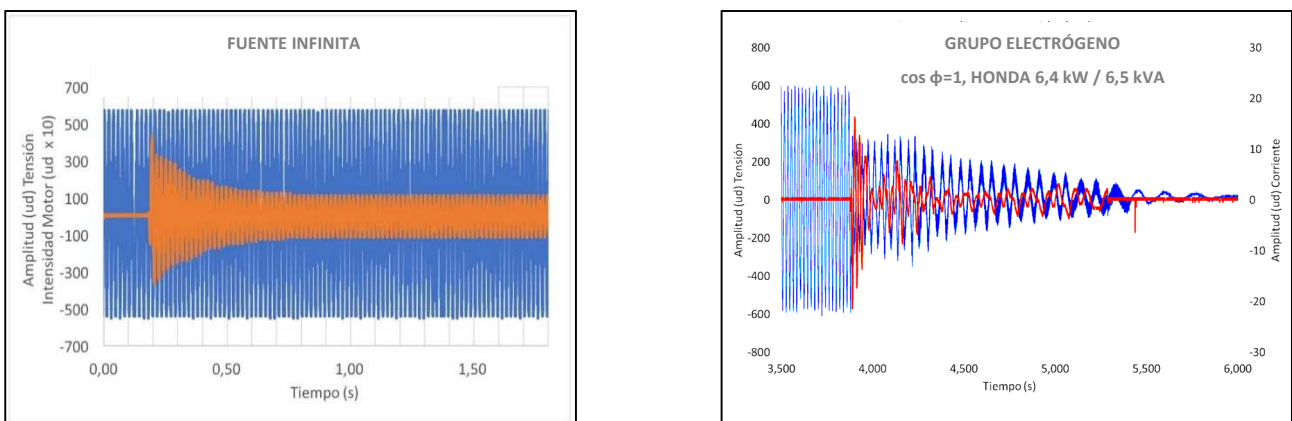
### 9.1 PREVIAS RESUMIENDO LA EXPERIMENTACIÓN

El objetivo de este trabajo, es mejorar la estabilidad de las plantas eléctricas navales, para hacerlas más robustas frente a transitorios de arranque de propulsores. Las plantas de generación eléctrica a bordo con alternadores síncronos cuya ( $I_{CC}=3*I_N$ ), deben aumentar su margen de corriente de cortocircuito del alternador, para que se asemeje lo más posible al de las instalaciones eléctricas terrestres alimentadas desde transformadores con ( $I_{CC}=20*I_N$ ).

Partimos de una situación tipo, reproducida en el laboratorio, en que el arranque directo de un motor de inducción, como el propulsor transversal de proa, provoca grandes huecos de tensión y bajadas de frecuencia. En la cadena energética de laboratorio ensayada, estas caídas de frecuencia, provocan la caída de la planta de generación, en 2 de cada 10 arranques. (Herrero-Sabat, A, Bosch-Tous, R, Alvarez-Florez, J. Casals-Torrens, P, Fontova-Serrano, 2020)

Para lograr la estabilidad de las plantas de generación eléctrica a bordo, el objetivo es asemejar su dimensionado al de las plantas terrestres, donde la corriente es suministrada por transformadores electromagnéticos estáticos, con corriente máxima, ( $I_{CC}=20*I_N$ ), es decir que son capaces de alimentar cargas, de forma transitoria hasta un factor de potencia,  $\cos \phi$  inferiores a 0,1.

Como ejemplo de la severidad, del arranque directo de grandes motores de inducción, en relación a la intensidad nominal  $I_N$  del alternador, se muestra en la Fig. 144, la comparativa de los registros gráficos del arranque de un mismo motor de inducción, de jaula de ardilla de 4 kW, 400V, 50 Hz, con fuente de potencia “infinita” (transformador III 50 kVA) y con grupo electrógeno HONDA 6,4 kW/ 6,5 kVA, que provoca la caída de la planta.



**Fig. 144: Arranque directo en vacío, del propulsor Novat de 4 kW, desde una fuente de potencia infinita (izquierda), sin alteración de tensión ni frecuencia y con grupo electrógeno  $\cos \phi=1$ , HONDA 6,4 kW / 6,5 kVA (derecha), sufriendo una calada del motor térmico, o “Blackout”. Tensión en azul, Corriente en rojo. Fuente: Propia**

A modo de resumen, se muestran en la Fig. 145, los registros oscilográficos de los arranques directos en vacío, del mismo motor de inducción Novat 4 kW, alimentando desde los dos grupos electrógenos estudiados, con tres escenarios diferentes, al primero lo denominamos “Hueco con planta  $\cos\phi=1$ ”, al segundo “Hueco con planta  $\cos\phi=0,5$ ” y al tercero “Hueco con planta  $\cos\phi=0,5$  + sistema ACEE”

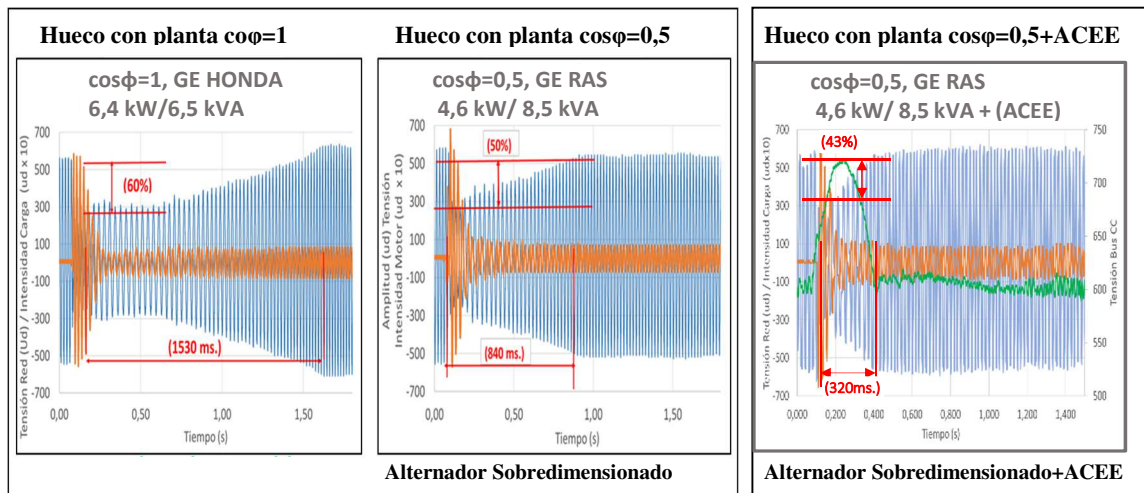
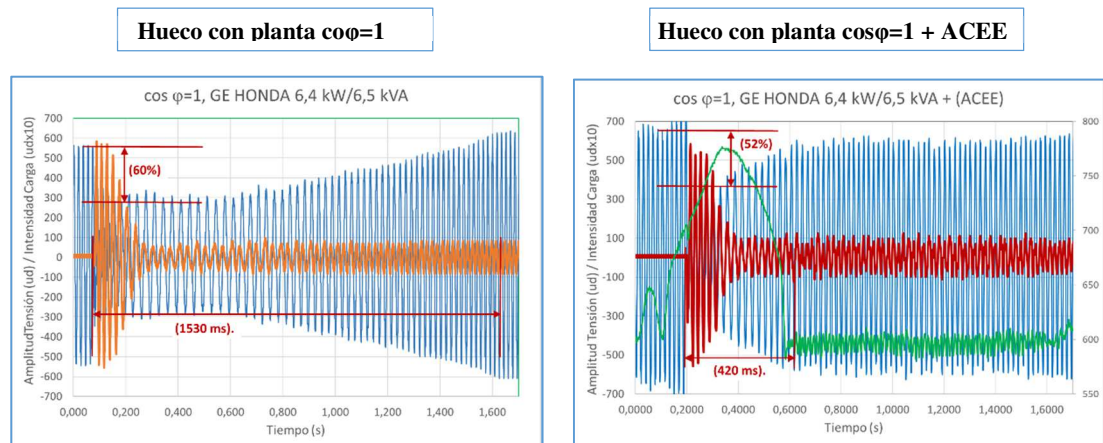


Fig. 145: Comparativa de la Tensión y Corriente del alternador, en un GE  $\cos\phi=1$  HONDA comercial ( $I_{cc}=30$  A), de otro sobredimensionado  $\cos\phi=0,5$  ( $I_{cc}=37$  A), y del mismo con apoyo adicional del sistema ACEE, en el arranque directo de un motor de inducción de 4 kW. Fuente: Propia

Los ensayos experimentales realizados con los GE,  $\cos\phi=1$ , HONDA 6,4 kW-6,5 kVA y,  $\cos\phi=0,5$ , RAS 4,6 kW-8,5 kVA, demuestran que un alternador sobredimensionado solo un 30% por encima del comercial, mejora sustancialmente la afectación y estabilidad de la tensión y frecuencia en bornes del alternador (tiempo de recuperación de 840 ms frente a 1530 ms y en la profundidad del hueco de tensión de 50% frente a 60%). Incluso reduciendo un 30% la potencia del motor térmico que lo arrastra. Si conectamos el sistema (ACEE) al alternador sobredimensionado, la mejora respecto al GE,  $\cos\phi=1$ , HONDA, se mejora sustancialmente (tiempo de recuperación de 320 ms frente a 1530 ms y en la profundidad del hueco de tensión de 43% frente a 60%).

De igual forma, se ha ensayado el arranque directo en vacío del motor Novat, alimentado del GE Honda con el sistema (ACEE), obteniéndose los resultados que se muestran en la Fig. 146.

## Conclusiones



**Fig. 146 Comparativa de la Tensión y Corriente del alternador, en un GE  $\cos \phi=1$  HONDA comercial ( $I_{cc}=30$  A) y del mismo con apoyo adicional del sistema ACEE, en el arranque directo de un motor de inducción de 4 kW. Fuente: Propia**

Los ensayos experimentales realizados con los GE,  $\cos \phi=1$ , HONDA 6,4 kW-6,5 kVA y con sistema (ACEE), demuestran que este sistema, mejora sustancialmente la afectación y estabilidad de la tensión y frecuencia en bornes del alternador (tiempo de recuperación de 420 ms frente a 1530 ms y en la profundidad del hueco de tensión de 52% frente a 60%).

A modo de resumen, y siempre con arranques directos en vacío, del motor Novat de 4 kW:

**Tabla 31. Huecos de tensión provocados por el arranque directo en vacío del motor Novat de 4 kW, alimentado de diversos grupos electrógenos y con la intervención del sistema (ACEE)**

Alimentación	Profundidad del hueco de tensión %	Tiempo de recuperación de la tensión ms.	Hechos
GE $\cos \phi=1$ HONDA 6,4 kW/6,5 kVA	60	1530	Afectación profunda.
GE $\cos \phi=1$ HONDA 6,4 kW/6,5 kVA + sistema (ACEE)	52	420	El sistema (ACEE) reduce casi 4 veces el tiempo de recuperación.
GE $\cos \phi=0,5$ RAS 4,6 kW/8,5 kVA	50	840	El sobredimensionado del alternador solo en un 30%, reduce casi a la mitad el tiempo de recuperación.
GE $\cos \phi=0,5$ RAS 4,6 kW/8,5 kVA + sistema (ACEE)	43	320	Los dos efectos sumados, reducen casi 5 veces el tiempo de recuperación.

De esta tabla, se concluye:

- La gravedad del hueco de tensión, (60%, 1.530 ms) que un motor de inducción de tan solo 4 kW, produce sobre un grupo electrógeno de 6,4 kW de máquina térmica / 6,5 kVA de alternador,  $\cos \phi=1$ .
- La eficacia del sobredimensionado del alternador del grupo electrógeno, que con tan solo un +30% de potencia de alternador ( $\approx +2$  kVA), e incluso disminuyendo una talla la máquina térmica ( $\approx -1,8$  kW), atenúa a la mitad el tiempo de recuperación del hueco de

tensión provocado por el arranque del motor de inducción, Novat de 4 kW, (desde 1.530 ms a 840 ms) y del 10% en la profundidad del hueco de tensión (del 60% al 50%).

- La gran eficacia de un sistema (ACEE) de 9 kW regenerativo, actuando en paralelo con los grupos electrógenos de alimentación, reduciendo (desde 1.530 ms a 420 ms) con el GE Honda 6,4 kW/6,5 kVA y (desde 840 ms a 320 ms) con el GE RAS 4,6 kW/8,5 kVA.

## Conclusiones

### 9.2 SOLUCIONES PARA LA ESTABILIDAD DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BORDO

Las plantas de generación eléctrica a bordo, deben ser capaces de suministrar la energía necesaria y por tanto mantener la tensión en bornes constante, incluso en una maniobra de máximas prestaciones como es un “Crash-Stop”, donde se producen grandes intensidades, por encima de las nominales y con componentes fuertemente inductivas, independientemente del tipo de motor eléctrico propulsor.

Para conseguirlo, se propone:

- Sobredimensionar de alternador, y/o
- Instalar sistemas de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE)

### 9.2.1 Sobredimensionado del alternador

Se trata de aumentar generosamente la inercia y la corriente máxima de cortocircuito del alternador, de tal manera que la corriente de arranque directo del mayor motor de inducción instalado a bordo, no supere la corriente máxima, que el alternador puede suministrar. Este concepto nos lleva en general a factores de sobredimensionamiento del alternador, del entorno de 2,5 veces o más, respecto a la potencia eléctrica activa instalada y por tanto a la de la máquina térmica que lo arrastra. Este tipo de conjuntos, pueden alimentar cargas con  $\cos \phi=0,4$  o inferiores, tal como solicitan los motores de inducción, en su arranque.

A su vez, se deben dimensionar las protecciones magnetotérmicas del alternador, de los motores y de la instalación, permitiendo trabajar de forma segura y sin pérdida de prestaciones, a su máxima corriente de sobrecarga, durante los transitorios de arranque y sin disparos intempestivos ni calentamientos peligrosos.(Herrero-Sabat, Bosch-Tous and Medes-García, 2022)

Se muestran en la Fig. 145, los registros del arranque directo en vacío, de un mismo motor de inducción de 4 kW 400 V. 50 Hz, alimentado por un grupo electrógeno comercial, formado por maquina térmica de 6,4 kW y alternador de 6,5 kVA,  $\cos \phi=1$  y con otro modificado, en el que se ha reducido el tamaño de la maquina térmica a 4,6 kW y aumentado la del alternador a 8,5 kVA,  $\cos \phi=0,5$ .

Obsérvese que siendo los alternadores mayores en kVA 6,5 y 8,5, a la potencia del motor de 4 kW, su arranque directo causa graves caídas de tensión, aunque menores, cuanto mayor es la potencia aparente del alternador.

Con grupo electrógeno comercial, (GE  $\cos \phi=1$ , HONDA 6,4 kW/6,5 kVA) se observa como la caída de tensión es mayor que el 60% y muy prolongada en el tiempo, con una recuperación de la misma, de más de 1.530 ms., reduciéndose su corriente en el arranque, incluso por debajo de su corriente en vacío a tensión nominal y disminuyendo fuertemente la frecuencia desde los 50 Hz hasta 32 Hz.

Con grupo electrógeno de alternador sobredimensionado, (GE  $\cos \phi=0,5$  RAS 4,6 kW/8,5 kVA), arrancando el mismo motor, la caída de tensión, es menor (<50%) y se recupera mucho antes, del orden de la mitad de tiempo, 840 ms., siendo su corriente de arranque, siempre superior a la de vacío y disminuyendo la frecuencia solo, desde los 50 Hz hasta los 42 Hz.

En el caso del alternador comercial, la potencia que realmente está suministrando, en condiciones de mitad de tensión y menos de la mitad de corriente, es inferior a  $\frac{1}{4}$  de la nominal. Las cargas reguladas electrónicamente, se habrán desconectado, al disminuir la tensión por debajo del umbral admisible, del entorno del -20% de la nominal.

## Conclusiones

Queda patente, que el sobredimensionamiento del alternador, mejora sustancialmente el comportamiento frente a arranques directos, de motores de inducción.

Con el sobredimensionamiento del alternador, se han obtenido mejoras en la reducción de los huecos de tensión, del 20% en profundidad, del 45% en duración y del 56% en frecuencia.

Esta es la solución más adecuada para nuevas construcciones.

### 9.2.2 Instalación de sistemas de acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE)

El sistema de acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE), es un sistema de regulación de velocidad electrónico regenerativo, con doble convertidor de frecuencia, y Plc interno programable, cuya operativa se realiza mediante un control anticipativo, en la presente experimentación.

Con el grupo electrógeno comercial, ( $\cos \phi=1$  HONDA 6,4 kW/6,5 kVA) y el sistema (ACEE) operando, se observa como la caída de tensión es del 52% y con una recuperación de la misma de 420 ms., y disminuyendo la frecuencia desde los 50 Hz hasta 40 Hz.

Es notable la contribución del sistema (ACEE), logrando una mejora del 52% frente al 60% de profundidad del hueco de tensión y de tiempo de recuperación de 420 ms frente a los 1.530 ms de grupo electrógenos sin (ACEE).

Con el grupo electrógeno de alternador sobredimensionado, (GE  $\cos \phi=0,5$  RAS 4,6 kW/8,5 kVA) y el sistema (ACEE) operando, se observa como la caída de tensión es  $< 43\%$  y con una recuperación de la misma de 320 ms., y disminuyendo la frecuencia desde los 50 Hz hasta 45 Hz.

Los sistemas de compensación de las caídas de tensión, impuestas por el arranque directo de grandes motores de inducción, basados en los acumuladores cinéticos de energía eléctrica (ACEE), suelen ir acompañados de grupos de condensadores electrolíticos, para aumentar la potencia reactiva, la potencia instantánea y la velocidad de reacción de la descarga de energía.

Con la estrategia de control por modo anticipativo del sistema (ACEE), se han obtenido los mejores resultados de reducción de los huecos de tensión, una mejora del 43% en profundidad y del 60% en duración.

Esta es la solución más adecuada para construcciones existentes, donde los costes de desmontaje y montaje del nuevo alternador lo justifiquen.



## Conclusiones

### 9.3 TRES CRITERIOS APARENTEMENTE ANTAGONISTAS, QUE DEBEN RESPETARSE EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, A BORDO

En este trabajo experimental, se han evidenciado 3 criterios que, de cumplirse, incrementan sustancialmente la estabilidad de las plantas eléctricas de generación a bordo: (Herrero-Sabat, Bosch-Tous and Medes-García, 2021)

- **Eficiencia**, criterio que esconde un perverso razonamiento, a los que, desde la cultura mecánica, analizan superficialmente las potencias necesarias a bordo y sin ser conscientes de ello, provocan la inestabilidad de la planta, en más barcos de lo deseable.

En electricidad, es crítico velar por las tensiones y corrientes a lo largo del tiempo, sin despreciar ni un milisegundo, siendo su producto la potencia activa o reactiva, que es una consecuencia, no un factor de diseño en sí misma.

El motor Diesel, tiene un rendimiento mediocre, pues solo transforma en par y velocidad, el 30% del potencial energético del combustible consumido.

El generador síncrono, fácilmente supera los rendimientos del 90%, sus pérdidas son inferiores al 10% de su potencia eléctrica generada.

Es aconsejable pues, sobredimensionarlo generosamente, para aumentar su inercia y poder suministrar correctamente la energía reactiva y las corrientes transitorias, que demandan los motores propulsores, si son de inducción. Acercándose así al comportamiento de los transformadores de las redes terrestres, en el cálculo clásico, con corrientes máximas de  $(20 \cdot I_N)$ .

Los controladores electrónicos de las cargas o de los propulsores eléctricos, son muy eficientes, pero generan distorsión armónica (THD), de las ondas de tensión y corriente. Esta deformación de la senoide suministrada por el alternador, provoca pérdidas añadidas y problemáticas solo conocidas por algunos especialistas, que también se resuelven sobredimensionando el alternador, respecto al Diesel que lo arrastra.

El diseño tradicional de plantas eléctricas con potencia del alternador igual a la potencia de la máquina térmica que le arrastra (1kW/1kVA), conduce a que esa planta eléctrica diseñada exclusivamente con criterios de eficiencia (cargas resistivas). Esta configuración no es capaz de suministrar adecuadamente, la corriente que demanda el propulsor transversal de proa (cargas inductivas), durante su arranque e incurre en más riesgos de los necesarios.

- **Control**, criterio “no evidente”, ya que la tensión en bornes debe mantenerse siempre constante, a pesar de posibles variaciones extremas de la corriente de carga, a nivel de fracciones de milisegundo.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

En los periodos en que el alternador suministra una corriente superior a la nominal, el alternador síncrono debe reforzar su campo magnético interno, aumentando la corriente de su devanado de excitación del campo magnético. Esta función la realiza su controlador de tensión (AVR). En los mejores conjuntos del mercado, la corriente máxima que puede alimentar el alternador síncrono, no supera tres veces la nominal ( $3 \cdot I_N$ ), valor insuficiente para el arranque de algunas cargas.

El motor Diesel es el que suministra la potencia activa nominal. En los episodios de sobrecarga y cortocircuito, son las inercias quienes aportan el par necesario, en forma de par y velocidad sobre el eje del alternador, para mantener la sobre corriente, durante un tiempo limitado. Un alternador sobredimensionado, traduce a corriente, estas energías cinéticas transitorias.

- **Protección**, criterio “en ocasiones olvidado”, ya que las protecciones, no deben disparar en los arranques normales de los motores eléctricos, aunque parezcan cortocircuitos a las fuentes que los alimentan; sólo deben actuar, si el incremento de corriente es mayor o dura más de lo previsto, por el calentamiento de los conductores, controles y máquinas eléctricas implicadas.

El calentamiento obedece a la ley de corriente al cuadrado por tiempo ( $I^2 \cdot t$ ). Suele ser admisible una sobrecarga eléctrica del 200% de la intensidad nominal  $I_N$ , durante un minuto.

El cortocircuito o corriente máxima de la instalación, en tierra del orden de  $20 \cdot I_N$ , debe poder resistirse durante al menos, un segundo, mientras disparan las protecciones.

No es tan caro a bordo como parece, sobredimensionar el alternador, para resistir esta sobrecarga, durante más tiempo.

## Conclusiones

### 9.4 CONCLUSIONES FINALES

Se han analizado las causas y herramientas teóricas de las caídas de tensión en las plantas. Son herramientas de cálculo poco utilizadas por algunos Armadores y Astilleros, que se centran más en los aspectos constructivos mecánicos, que en los transitorios eléctricos. La estabilidad de las plantas requiere mucho tiempo de análisis previo a la construcción y mediciones oscilograficas, durante algunos episodios de arranque, como el del motor transversal de proa.

Se han reproducido en el laboratorio, de forma fiable, una serie de grupos electrógenos representativos de las diferentes casuísticas a estudiar, consiguiéndose caídas de planta durante el arranque de un motor de inducción.

Se ha centrado el estudio en el arranque directo de motores de inducción, demostrándose que es una de las cargas más conflictivas a bordo, pues genera problemas de estabilidad y caídas de planta.

Se ha cuantificado que, con motores de inducción, de la mitad de potencia del alternador que los alimenta, el riesgo de caída de planta en sus arranques, resulta significativo.

Se ha verificado la utilidad del análisis de los huecos de tensión, como herramientas para el estudio de la estabilidad de las plantas a bordo.

El registro oscilográfico de las tensiones y corrientes, permite determinar la profundidad y duración de los huecos. Estos parámetros resultan muy eficaces para determinar el margen de estabilidad de las plantas y la utilidad de las soluciones posibles.

El uso del sistema (ACEE) es positivo, pero no espectacular. El ajuste de sus parámetros de funcionamiento no resulta rápido ni trivial.

Suele resultar más barato y rápido de instalar, el sobredimensionado del alternador.

Los diferentes sistemas de regulación f- P, V-Q, del alternador y de velocidad del propulsor u otros motores, pueden entrar en conflicto entre sí en algunas aplicaciones, requiriendo un estudio específico y detallado, incluso durante la puesta en servicio.

Sobredimensionar el alternador respecto al Diesel que lo arrastra, permite que el sistema de regulación V-Q, pueda hacer frente a las demandas de energía reactiva, y distorsiones armónicas por parte de la carga, sobre todo durante los transitorios de arranque de los motores propulsores.

Estos arranques demandan una potencia instantánea extra durante algún segundo, que puede ser suministrada por las inercias, de las masas rodantes del Diesel y del alternador, siempre que el alternador tenga un sobredimensionado adecuado, para poder hacer frente a las corrientes transitorias demandadas por la carga.

### **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Los controles electrónicos de los propulsores, introducen deformaciones armónicas en las ondas de tensión y corriente, que también se compensan con el sobredimensionado del alternador. Este, en los buques con posicionamiento dinámico podría llegar a ser del 500%, respecto al motor Diesel que lo arrastra. Es decir, en este caso el conjunto Diesel generador, debe poder alimentar cargas de forma permanente con factor de potencia de 0,2.

Control, protecciones y eficiencia, deben coordinarse entre sí, para lograr el buen funcionamiento de la cadena energética. (Herrero-Sabat, 2022)

## 10 APORTACIONES DEL TRABAJO

Las aportaciones principales del presente trabajo son:

1. Reproducción en el laboratorio, a nivel de 10 kW, de casuísticas reales de caídas de planta y análisis experimental de cómo evitarlas.
2. Demostración de que las plantas construidas con grupos electrógenos, cuyo  $\cos \varphi=1$ , es decir con el factor de potencia pensado para alimentar en permanencia solo cargas resistivas, son inestables si alimentan cargas dinámicas o consumos muy inductivos.
3. En los ensayos realizados se han conseguido arranques estables, de motores de inducción de hasta 4 kW, alimentados por un grupo electrógeno de 4,6 kW motor térmico / 8,5 kVA alternador, correspondiente a un  $\cos \varphi=0,5$  en permanencia. Grupos electrógenos dimensionados para poder alimentar de forma permanente, factores de potencia inferiores, originan mayor estabilidad al sistema.
4. Construcción de un sistema acumulador cinético de energía eléctrica (ACEE) de 7,4 kJ/25 A, basado en la experiencia de (ARISA), que los aplica en las prensas de estampación en frío, 100% eléctricas. Este sistema (ACEE) es compatible con los grupos electrógenos ensayados.
5. Ensayo del sistema (ACEE) con los dos grupos electrógenos, que reproducen la situación de  $\cos \varphi=1$  (HONDA 6,4 kW / 6,5 kVA) y la deseable de  $\cos \varphi=0,5$  o menor (RAS 4,6 kW / 8,5 kVA).
6. Con el tiempo y medios disponibles, se han observado mejoras de estabilidad sustanciales, pero no resultados espectaculares.
7. El ajuste del sistema (ACEE) no es trivial y requiere coordinación con los controles de toda la cadena energética.
8. Se ha hecho una cierta difusión de los resultados en el sector de la ingeniería naval.

## 11 TRABAJOS FUTUROS

- 11.1 ESTUDIO DE ARMÓNICOS DEL SISTEMA (ACEE).
- 11.2 EL SISTEMA (ACEE) CON CARGAS CÍCLICAS.
- 11.3 EFECTO GIROSCÓPICO DEL SISTEMA (ACEE).
- 11.4 REGULACIÓN DE F-P, V-Q, MEDIANTE EL SISTEMA (ACEE), EN ALTERNADORES LIMITADOS EN EL CONTROL DE ESTAS MAGNITUDES.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

ABS, A. B. of S. (2022) *Rules for Building and classing Marine Vessels*.

Agencia Seguridad Marítima Finlandesa (2022) 'Power Failure of Ships.Safety Study', *Power Failures on Ships*, p. 52.

Amiryar, M. E. and Pullen, K. R. (2017) 'A review of flywheel energy storage system technologies and their applications', *Applied Sciences*. City, University of London, UK. doi: 10.3390/app7030286.

Aneke, M. and Wang, M. (2016) 'Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review', *Applied Energy, University of Sheffied , UK*. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.097.

Araceli, A. and Sillero, C. (2018) 'Revisión De Métodos Para La Estimación De Los Estados De Carga Y Salud De Una Batería', *Pistas Educativas*. Mexico.

Atcitty, S. *et al.* (2013) 'Battery Energy Storage System', *Green Energy and Technology*. Mexico. doi: 10.1007/978-1-4471-5104-3\_9.

Atputharajah, A. and Saha, T. K. (2009) 'Power system blackouts - literature review', in *ICIIS 2009 - 4th International Conference on Industrial and Information Systems 2009, Conference Proceedings*. Jaffna, Sri Lanka. doi: 10.1109/ICIINFS.2009.5429818.

Baldick, R. *et al.* (2008) 'Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems', in *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES*. Electrical & Computer Engineering at The University of Texas at Austin.Estados Unidos. doi: 10.1109/PES.2008.4596430.

Bañeres S., M. and Cortina P., J. L. (2003) 'Estudio de alternativas en el reciclaje de baterías de plomo fuera de uso', *UPCommons*. Barcelona.

Bolao i Cano, B. and Bosch-Tous, R. (2018) *Aportacions a la Motorització elèctrica híbrida de lèmbarcació LADY/ UPC Commons, TFE*.

Bolund, B., Bernhoff, H. and Leijon, M. (2007) 'Flywheel energy and power storage systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Seabased Industry AB, Uppsala, Sweden. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004.

Bosch-Tous, R, Casals-Torrens, P, Alvarez-Florez, J, Serrano-Fontova, A. (2018) 'Hybrid Gas-Electrical Power & Heavy duty Propulsion:Test Platform', *IAMU*. Barcelona.

Bosch-Tous, Ricard, Pifarre-Martinez, David, Orús-Valls, Joan, Planas, Arnau, Ferrero-Aragones, Eduard, Puig-Mas, Francesc, Raurich-Molinas, LLuis, Morato-Guell, Moisés, Calaf-Centellas, Oriol, Fonseca-Casañas, S. (2005) *Despertaferro el cotxe solar català*. Edited by C. O.

d'Enginyers I. de Catalunya. Barcelona UPC.

Bosch-Tous, R. (1990a) ‘Cargas dinámicas en Grupos Electrógénos de Emergencia’, *Automatica e Instrumentacion*. Barcelona.

Bosch-Tous, R. (1990b) ‘Informe especial, Grupos Electrógénos de Emergencia’, *Automatica e Instrumentacion*. Barcelona.

Bosch-Tous, R. (2018) ‘Control Protecció de Sistemes Elèctrics, Recull d’apunts’. CPDA-ETSEIB-UPC, Barcelona.

Bosch-Tous, R., Casals-Torrens, P. and Serrano-Fontova, A. (2018) ‘Transient stability assessment of a hybrid gas-electrical ship propulsion: Model Validation’, in *IAMU*. Barcelona.

De Brito, M. A. G. *et al.* (2013) ‘Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Mato Grosso do Sul, Brazil. doi: 10.1109/TIE.2012.2198036.

Brunner, C. U., Werle, R. and Evans, C. (2013) ‘Standard Format for IEC Standards - Learning from motor standards for other electric equipment’, in *International Conference EEMODS '13 Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Publication office of the European Union*.

Bureau Veritas (2022) *Rules for the Classification of Steel Ships*.

Calvete, J. (2010) *Mejoras en la eficiencia de sistemas eléctricos autónomos de tracción mediante técnicas de conmutación dinámica de recursos energéticos*. Barcelona. UPC Commons.

Canadian Standards Association (CSA) (2009a) *[Basic and safety principles for man-machine interface, marking and identification – Identification of equipment terminals, conductor terminations and conductors (IEC 60445), International Organization*. doi: 10.1021/es0620181.

Canadian Standards Association (CSA) (2009b) *Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements (IEC 60204-1 2009), International Organization*. doi: 10.1021/es0620181.

Capella-Caritx, R. (2015) ‘Permutación de una alimentación eléctrica, por otra procedente de un grupo electrógeno.’, *ETSEIB /UPC Editions*.

Carrasco M (2017) ‘Efecto De La Temperatura En Las Baterías’, *Rebacas*. Sonora University, Mexico.

Carreras, B. A. *et al.* (2002) ‘Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts’, *Chaos*. Universidad de Palma de Mallorca.: American Institute of Physics Inc., 12(4), pp. 985–994. doi: 10.1063/1.1505810.

Castillo, J. and Marrufo, E. (2010) ‘Unidad 11. Motores eléctricos’, *Instalaciones Electricas*



## Bibliografía

*Basicas*. CIFP ‘Ciudad de Béjar’ Béjar, Castilla y León, España.

Chen, H. *et al.* (2009) *Progress in electrical energy storage system: A critical review*, *Progress in Natural Science, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK*. doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.

Cheng, K. W. E. *et al.* (2011) ‘management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles Battery-’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China. doi: 10.1109/TVT.2010.2089647.

Circutor (2015) *Armónicos de ranura en sistemas de generación eléctrica*. Barcelona.

‘Control Techniques’ (no date) *Uni M Regen Design Guide Issue 4 (0478-0366-04)\_Approved*. Newtown Wales UK.

Copetti, J. and Macagnan, M. (2007) ‘Baterias En Sistemas Solares Fotovoltaicos’, *Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Brasil.

Cortes-Cherta, M. (1974) ‘Curso Moderno de Maquinas electricas rotativas’, in Asociados, E. (ed.). Barcelona: Gersa, Barcelona, p. 272.

Cortés-Cherta, M., Corrales-Martín, J. and Ensenyat-Badias, A. (1991) *Teoría General de Máquinas Eléctricas*. UNED, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.

Cueva Sánchez, E. J. *et al.* (2018) ‘Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices’, *Enfoque UTE*. doi: 10.29019/enfoqueute.v9n1.202.

Delta Volt SAC (2015) ‘Baterías para sistemas solares y eólicos’, *Delta Volt: Energía Renovable*. Perú.

Det Norske Veritas (2022) ‘How to best prevent Blackouts on passenger vessels-DNV’, <https://www.rivieramm.com>.

Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (2015) ‘Rules and Regulations for the Classification of Ships’, in *Notice No. 9*. Oslo, Noruega. doi: 10.1039/b312883k [doi].

Domingo, G. F. (2015) ‘Freno Regenerativo.’, *Universidad de Chile*.

Don H. Johnson (2003) ‘Equivalent circuit concept: the voltage-source equivalent’, in *IEE vol91*, p. 4.

Dudgeon, G. J. W. *et al.* (2007) ‘The effective role of AVR and PSS in power systems: Frequency response analysis’, *IEEE Transactions on Power Systems*. Natick, United States. doi: 10.1109/TPWRS.2007.908404.

Duran-Pascual, A. (2020) *Control de acumuladores cinéticos de energía eléctrica para reforzar la estabilidad de las plantas eléctricas navales*. Facultad de Náutica de Barcelona/ UPC TFG.

Elgerd, O. I. (1981) ‘Control of Electric Power Systems’, *IEEE Control Systems Magazine*. University, Florida, Estados Unidos,. doi: 10.1109/MCS.1981.1100766.

Fernández, H. *et al.* (2005) ‘Modelaje y simulación de una batería de plomo ácido mediante fuentes dependientes de voltaje - corriente y bloques de funciones aritméticas’, *Universidad, Ciencia y Tecnología*. Vice Rectorado Puerto Ordaz, Venezuela.

Fox-Penner, P. (2005) ‘Rethinking the grid: Avoiding more blackouts and modernizing the power grid will be harder than you think’, *Electricity Journal, Boston, United States*. doi: 10.1016/j.tej.2005.02.003.

Gao, J., Wang, X. and Zhang, L. (2010) ‘Some Special Operation Modes of Synchronous Machine Systems at Constant Speed and Variable Speed’, in *AC Machine Systems*. Heidelberg, Germany. doi: 10.1007/978-3-642-01153-5\_3.

Garrigosa García, R. (2017) *Anàlisi experimental de la problemàtica de càrrega-descàrrega de ACEE aplicables en transports*. Tesis Doctoral, UPC Barcelona.

George S. Misyris *et al.* (2017) ‘On battery state estimation algorithms for electric ship applications’, *Electric Power Systems Research*. Aristotle University of Thessaloniki, Greece. doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.009.

Giraldo Buitrago, D., Bolaños Ocampo, R. and Correa Flórez, C. (2006) ‘Control de frecuencia y voltaje en tiempo real de un generador síncrono.’, *Scientia et Technica*. Universidad de Sucre, Colombia. doi: 10.22517/23447214.6207.

Gomes, D. R. and Chabu, I. E. (2010) ‘Studies on electrical stresses in rotating rectifiers for brushless exciters’, in *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2010*. Groningen, Netherlands. doi: 10.1109/Induscon.2010.5739945.

Hans Sauer (1986) *Modern Relay Technology*. 2nd Dr Alf. Edited by H. Alfred Huethig Verlag GmbH. Heidelberg.

Hedlund, M. *et al.* (2015) ‘Flywheel energy storage for automotive applications’, *Energies*. Gotemburgo, Suecia. doi: 10.3390/en81010636.

Herman, F. *et al.* (2006) ‘Obtención de la máxima potencia en paneles fotovoltaicos mediante control directo: corriente a modulación por ancho de pulsos’, *Universidad, Ciencia y Tecnología*. Bolívar, Venezuela.

Herrero-Sabat, A, Bosch-Tous, R, Alvarez-Florez, J, Casals-Torrens, P, Fontova-Serrano, A. (2020) ‘Contributions for improving the stability of marine power generation plants’, *Engineering Failure Analysis*, Editorial. Elsevier., p. 21.

Herrero-Sabat, A. (2022) *Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación*

## Bibliografía

*Eléctrica, con Volantes de Inercia*". Facultad de Nautica de Barcelona/ FNB/ UPC Tesis Doctoral Pendiente de Lectura.

Herrero-Sabat, A., Bosch-Tous, R. and Medes-García, J. (2021) 'Generación eléctrica a bordo; Eficiencia, Control y Protección.', in. 60 Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima .La Coruña: Asociación de Ingenieros Navales de España, AINE, p. 306.

Herrero-Sabat, A., Bosch-Tous, R. and Medes-García, J. (2022) 'The Generosity with te reactive energy, avoids the falls of the electrical plants on board.', in 9th International Conference on Maritime Trasnport MT22 (ed.). Barcelona.

Hirsch, A., Parag, Y. and Guerrero, J. (2018) 'Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. San Diego Univeristy, Florida , USA. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.040.

Honda (2016) 'Honda Engines <[http://www.honda-engines-eu.com/es/engine-model-details?p\\_p\\_id=enginedetail\\_WAR\\_enginedetail&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-4&p\\_p\\_col\\_count=1&\\_enginedetail\\_WAR\\_enginedetail\\_display=specifications&e=17](http://www.honda-engines-eu.com/es/engine-model-details?p_p_id=enginedetail_WAR_enginedetail&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-4&p_p_col_count=1&_enginedetail_WAR_enginedetail_display=specifications&e=17)>'.</p></div>
<div data-bbox="137 456 888 495" data-label="Text">
<p>I.Elgerd, O. (1983) 'Electric Energy Systems Theory.An Introduction.' 1983rd edn. Edited by M.-H. B. Co. Carnegie -Mellon University,Florida , Estados Unidos.</p></div>
<div data-bbox="137 508 888 547" data-label="Text">
<p>International Electrotechnical Commission, I. (2009a) 'IEC 60038 -2009: IEC standard voltages', *Policy*.</p></div>
<div data-bbox="137 560 889 643" data-label="Text">
<p>International Electrotechnical Commission, I. (2009b) 'IEC 60060-1 High- voltage test techniques - Part1: General definitions and test requirements', *International Electrotechnical Commission, IEC*. Ginebra; International Electrotechnical Commission; Suiza. doi: 10.1021/es0620181.</p></div>
<div data-bbox="137 657 888 696" data-label="Text">
<p>International Electrotechnical Commission, I. (2010) *IEC 60060-2 High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems, Power*.</p></div>
<div data-bbox="137 709 888 770" data-label="Text">
<p>ISO 10303-21 (2016) 'Industrial automation systems and integration–product data representation and exchange- Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure', *ISO Central Secretariat*. Geneve; Switzerland.</p></div>
<div data-bbox="137 783 889 845" data-label="Text">
<p>Iverson, J. (2007) 'How to size a genset: Proper generator set sizing requires analysis of parameters and loads', *Cummins Power Generation*. Columbus, Indiana, Estados Unidos. Available at: <https://www.cumminspower.eu/www/literature/technicalpapers/PT-7007-SizingGensets-en.pdf>.</p></div>
<div data-bbox="137 857 888 897" data-label="Text">
<p>Kanellos, F., Hatzilau, I. K. and Prousalidis, J. (2007) 'Investigation of voltage/frequency modulation in ship electric networks with pulsed loads according to STANAG 1008 design</p></div>
<div data-bbox="732 915 888 934" data-label="Page-Footer">
<p>Página 293 de 340</p></div>
<div data-bbox="142 936 376 968" data-label="Page-Footer">
<p><img alt="UPC Logo" data-bbox="142 936 188 968" style="vertical-align: middle;"/> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Facultat de Nàutica de Barcelona</p></div>

constraints’, *All Electric Ship (AES) 2007 The Vision Redrawn*. Technical University of Crete Chaniá, Crete, Greece.

Kjerstad, O. K. and Skjetne, R. (2016) ‘Disturbance Rejection by Acceleration Feedforward for Marine Surface Vessels’, *IEEE Access*. Isla de Barents; University Centre in Svalbard. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2553719.

Kosztaluk, R., Loboda, M. and Mukhedkar, D. (1981) ‘Experimental study of transient ground impedances’, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Instytut Energetyki; Warsaw; Poland. doi: 10.1109/TPAS.1981.316807.

Lafoz, M. *et al.* (2014) ‘Utilización del frenado regenerativo de trenes suburbanos para la recarga rápida de automóviles eléctricos en corriente continua’, *Vertices- Cliemat, Madrid*.

LLOYD’s Register (2014) *Rules and Regulations for the Classification of Ships, Notice No. 9*. London, UK.

Martínez-Bertran, J. (2017) ‘Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas’, *ETSEIB*.

Martinez-Velasco, J. A. (2010) *Power System Transients - Parameter Determination*. CRC Press, *CRC Press*. CRC Press. Edited by T. & F. Group. Boca Ratón, Florida.

Motor, M., Motor, M. and El, S. C. (2009) ‘Tipos de motores de corriente continua’, *Ies Villalba Hervás*. Orotava, Santa Cruz de Tenerife.

Mutarráf, M. U. *et al.* (2018) ‘Energy storage systems for shipboard microgrids—A review’, *Energies, Erlangen Germany*. doi: 10.3390/en11123492.

Oriol, B, Sainz, L, Córcoles, F. and Suelves, F. (2002) *Tecnología Eléctrica*. Profesores Departamento de Ingeniería Eléctrica de la ETSEIB-UPC, Ediciones. Ceysa Barcelona 2002.

Ortiz-Quisbert, M. E. *et al.* (2016) ‘Control Adaptativo Fraccionario Optimizado por Algoritmos Genéticos, Aplicado a Reguladores Automáticos de Voltaje’, *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informática Industrial*. doi: 10.1016/j.riai.2016.07.004.

Pacheco, J. and Moncada, R. (2017) ‘Calculation of losses and energy efficiency of synchronous reluctance machines according to IEC standard 60034-2’, in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Chileton 2017 - Proceedings*. Chile. doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229574.

Patel, M. R. (2011) *Shipboard Electrical Power Systems, Shipboard Electrical Power Systems*. Professor, Department of Marine Engineering 300 Steamboat Road Kings Point, NY 11024 Estados Unidos. doi: 10.1201/b11359.

Payvand, B. and Hosseini, S. M. H. (2019) ‘A new method for mitigating frequency fluctuations

## Bibliografía

in ships with electrical propulsion', *ISA Transactions*. ETH Zurich. doi: 10.1016/j.isatra.2019.02.013.

Peregrina Velasco, A. and Grau Mur, R. (2007) *Diseño y Construcción del sistema de propulsión eléctrica de un catamarán de 3,4 metros de eslora*. PFC, Facultad Náutica Barcelona-UPC.

Pernía, A. (2014) 'Conceptos Básicos de Máquinas Síncronas', [https://www.researchgate.net/publication/235752001\\_Maquinas\\_Sincronicas\\_Conceptos\\_basicos](https://www.researchgate.net/publication/235752001_Maquinas_Sincronicas_Conceptos_basicos). Universidad Nacional Experimental del Táchira, UNET San Cristóbal, Tachira, Venezuela.

PES (2006) 'IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies', *IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992)*. Geneva, Switzerland. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.99499.

Pi, R. *et al.* (2018) 'Machine learning based on bayes networks to predict the cascading failure propagation', *IEEE Access*. Turin, Italy. doi: 10.1109/Access.2018.2858838.

Prousalidis, J. *et al.* (2008) 'Electric Power Supply Quality in ship systems: an overview', *International Journal of Ocean Systems Management*. Athens, Greece, p. 68. doi: 10.1504/ijosm.2008.017782.

Qi, J., Sun, K. and Mei, S. (2015) 'An interaction model for simulation and mitigation of cascading failures', *IEEE Transactions on Power Systems*. Orlando, United States. doi: 10.1109/TPWRS.2014.2337284.

Radan, D. *et al.* (2016) 'Integration, optimisation and benefits of energy storage for marine applications', in *13th international naval engineering conference and exhibition, Institute of Marine Engineering, Science and Technology, Bristol*.

Rairán, J., Guerrero, C. E. and Mateus, J. A. (2010) 'Diseño de controladores de tipo proporcional integral derivativo (PID) y difuso para la posición de un motor de corriente continua (DC)', *Ingeniería y Universidad, Bogotá, Colombia*.

Ravindranath, B. and Chander, M. (1977) *Protecciones de Sistemas de Potencia e Interruptores*. 1980th edn. Edited by Editorial LIMUSA SA. Mexico D.F.

REE (2014) 'Red Eléctrica pone en servicio en Lanzarote un volante de inercia para estabilizar la frecuencia y la tensión'.

REE (2018) 'Red Eléctrica solicitud de informe del Gobierno de Canarias. Autorización definitiva a REE de un Volante de inercia.'

Ribeiro, P. F., Steurer, M. and Islam, M. (2004) 'Re-evaluating electric power system harmonic distortion limits for shipboard systems', *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. Itajuba, Brazil. doi: 10.1109/ichqp.2004.1409439.

Salazar, A. (2017) ‘Thevenin, Norton y Máxima transferencia de Potencia’, *Universidad de los Andes*. Colombia.

Samra, A. H. and Islam, K. M. (1995) ‘Harmonic effects on synchronous generators voltage regulation’, in *Conference Proceedings - IEEE Southeastcon*. Miami University, Estados Unidos. doi: 10.1109/secon.1995.513121.

San Martín, J. I. *et al.* (2017) ‘Energy storage technologies for electric applications’, in *Renewable Energy and Power Quality Journal*. Basque University, España, pp. 593–598. doi: 10.24084/repqj09.398.

Sánchez, C. (2013) ‘Red Eléctrica instalará un volante de inercia para almacenar energía en sistemas eléctricos aislados de Lanzarote’, *REE*.

Sancho, J. R. V. (2021) <https://automatismoidustrial.com/-baja-tension/motores/1-3-5-motores-de-corriente-continua/1-3-5-6-sistemas-de-excitacion/>.

Say, M. G. (2003) ‘Electricity’, in *Instrumentation Reference Book: Third Edition*. Electrical Engineering at Heriot-Watt University, UK. doi: 10.1016/B978-075067123-1/50043-0.

Siemens- AG, D. (2014) *Energy management for Servo Presses*. Erlangen Germany.

Tterjee, S. and Mukherjee, V. C. (2016) ‘PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique’, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Oxford University, UK. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.010.

UNED de la asignatura “Centrales Eléctricas” (2008) ‘Regulación, Control y Protección de los alternadores.’, in *UNED*.

Vargas, L. (2013) ‘Regulador de tension en generadores síncronos para control volt/VAR en sistemas de distribución.’, *Universidad de Costa Rica*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Vega, C. A. S. and Mayor, J. P. (2015) ‘Cargador industrial con control de la curva de carga para baterías de Pb ácido.’, *Biomass Chem Eng*. Buenaventura University, Colombia.

Zhou, Z. *et al.* (2013) ‘A review of energy storage technologies for marine current energy systems’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Yncréa Ouest, Brest, France. doi: 10.1016/j.rser.2012.10.006.

## A ANEXOS

### A.1 ANEXO 1 OSCILACIONES TORSIONALES OBSERVADAS EN LA CARGA ROTATIVA CONSIDERADA

Se ha observado que, en vacío se produce una oscilación torsional del rotor en el entorno a la velocidad de sincronismo, superpuesta a su rotación, lo que provoca una oscilación de baja frecuencia en el estator.

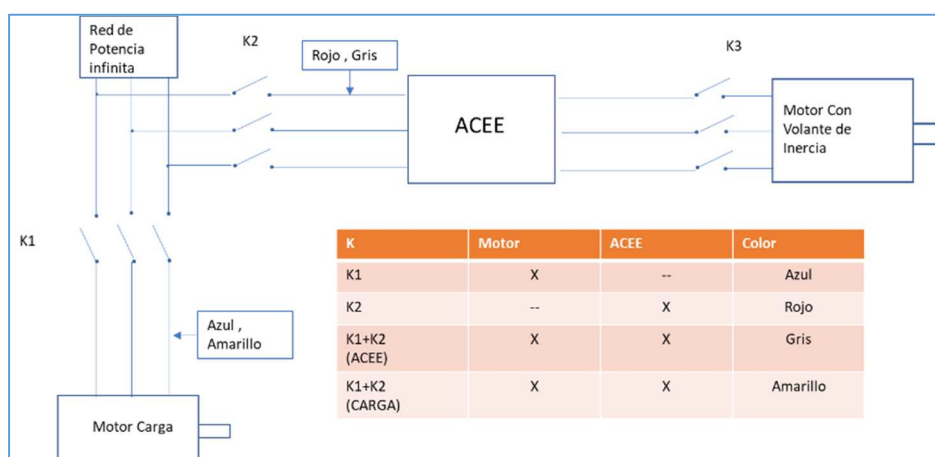
Esta vibración es potencialmente peligrosa, ya que, si no se amortigua adecuadamente, puede generar fenómenos de resonancia torsional entre el motor del sistema (ACEE) y el motor de la carga, aumentando el nivel de vibración y en casos extremos, ocasionar circulaciones de corriente entre ellos inaceptables, afectando al buen funcionamiento del sistema.

Realizando un estudio frecuencial de la tensión de alimentación, se pretende identificar el rango de frecuencias, en las que se produce este fenómeno, posponiendo para un trabajo futuro, un estudio más exhaustivo de las medidas para minimizarlo y, por tanto, asegurar la estabilidad del sistema.

Para realizar este estudio, se ha registrado el espectro de la tensión, en diferentes escenarios de operación del sistema (ACEE):

- Propulsor “Novat” (carga)
- Sistema (ACEE)
- Sistema (ACEE) + Carga (medido en la alimentación de (ACEE))
- Sistema (ACEE) + Carga (medido en la alimentación de la carga)

Según el esquema siguiente Fig. 147:



**Fig. 147: Puntos de medida del análisis espectral.**Fuente: Propia.

La adquisición de datos se ha realizado con:

- Osciloscopio digital Yokogawa digital DL1640.



## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

- Frecuencia de muestreo: 100 kM/s
- Análisis de frecuencia: 2 kHz ( $\Delta f$ :10 Hz) y un 2º análisis: 500 Hz ( $\Delta f$ :1 Hz)

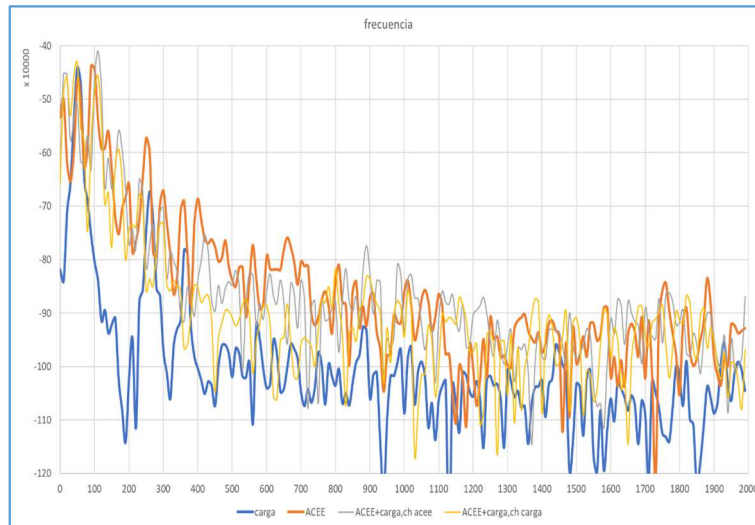
Las características de los diferentes componentes para estas pruebas son:

- Grupo electrógeno “RAS”
  - 4,6 kW/8,5 kVA
  - 400 V, 50 Hz
  - 12,3 A nominal
  - $\text{Cos } \phi=0,5$
- Propulsor de carga “Novat”
  - 4 kW
  - 400 V / 50 Hz
  - 8,5 A nominal
- Sistema (ACEE)
  - Motor de 9 kW
    - 400 V / 50 Hz
    - 21 A nominal
  - Convertidor de frecuencia (VSD) (Configuración modo Par)
    - Intensidad limitada al 20%.
    - Referencia de par de aceleración 8%
    - Referencia de par de frenado 19%
    - Frecuencia de conmutación de los VSD de 8 kHz



A.1.1 Análisis de las señales

Se realiza un primer análisis a 2 kHz y  $\Delta f$ :10 Hz, que se puede observar en la Fig. 148:



**Fig. 148: Registro Espectral a 2 kHz y  $\Delta f$  10 Hz, mediante FFT.**  
Fuente: Propia.

De este análisis, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Conectada únicamente la Carga (Azul).
  - El espectro de la corriente, muestra que la componente principal es la fundamental (1er armónico [50 Hz]) y una menor participación de los armónicos (5º y 7º).
- Conectado únicamente el (ACEE) (Rojo).
  - Se observa un aumento considerable de los armónicos debido fundamentalmente a los (VSD).
- Conectados (ACEE) y Carga (Gris y Amarillo).
  - Los espectros son similares a los observados con el sistema (ACEE) en solitario, lo que nos indica que la perturbación de la señal, es debida principalmente al sistema (ACEE) con toda su circuitería asociada (Fundamentalmente (VSD)).
  - Aparición de una resonancia de baja frecuencia (15÷20 Hz) asociada al fenómeno de la vibración torsional pendular estudiado.
  - Necesidad de realizar un estudio más detallado de la baja frecuencia con  $\Delta f$ :1 Hz para identificarlo adecuadamente.

En la siguiente gráfica, se observa mejorada la discretización frecuencial a 1 Hz y con ello se puede realizar un mejor estudio de las señales.

Este gráfico Fig. 149, corresponde al caso de (ACEE) y Carga conectados:

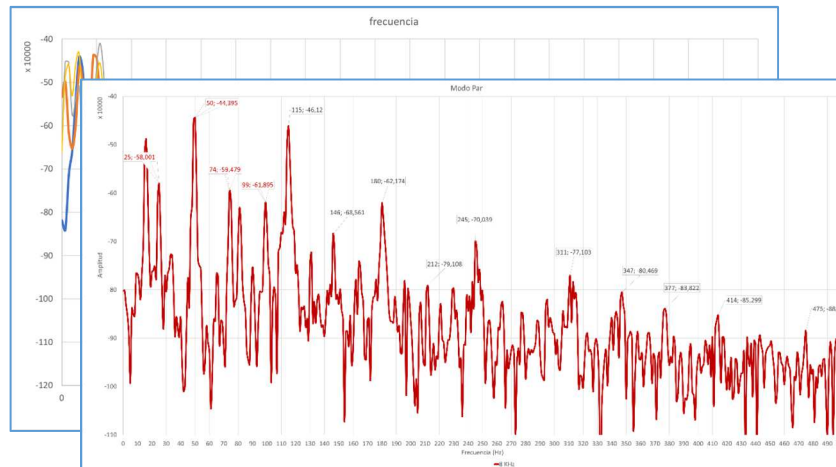


Fig. 149: Registro Espectral con  $\Delta f$ : 1 Hz (ACEE) y Carga conectados. Fuente: Propia.

De este análisis se pueden extraer los siguientes datos:

- Pico a 50 Hz (red) y sus armónicos.
- Pico a 25 Hz (sub armónico de red) sumado a la fundamental de la velocidad de giro del motor Carga (1500 rpm)
- Pico a 16 Hz y su 2º armónico a 33 Hz. (16 es el resultado aproximado de dividir 50Hz/3)
- Pico a 115 Hz y subsiguientes picos separados 65 Hz entre ellos. (180, 245, 311 y 377 Hz)
- Pico de muy baja frecuencia sobre los 15 Hz. (para identificar exactamente la frecuencia, es necesario realizar zoom, que se muestra a continuación)

A.1.2 Análisis de muy baja frecuencia

En el siguiente gráfico Fig. 150, se amplía la zona por debajo de los 60 Hz para un estudio más detallado:



Fig. 150: Registro Espectral de muy baja frecuencia, hasta 60 Hz. Motor Novat usado como carga y girando en vacío. Fuente: Propia.

De este análisis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Conectados (ACEE) y Carga
  - Pico a 50 Hz. (red)
  - Pico a 25 Hz. (sub-armónico de red) y fundamental de la velocidad de giro motor Carga (1500 rpm)
  - Pico a 16 Hz (sub-armónico  $\frac{1}{3}$  de red) y su 2º armónico a 33 Hz (oscilación pendular)

Esta frecuencia de 16 Hz es la que, por percepción acústica y de vibraciones del motor de carga, corresponde a la oscilación pendular provocada por la interacción del generador de red, la carga y el sistema (ACEE).

A.1.3 Análisis de muy alta frecuencia

En la señal de red de los generadores en isla, hay componentes de alta frecuencia en toda la senoide, claramente perceptibles en los picos de la misma, tal como se observa en la Fig. 151:

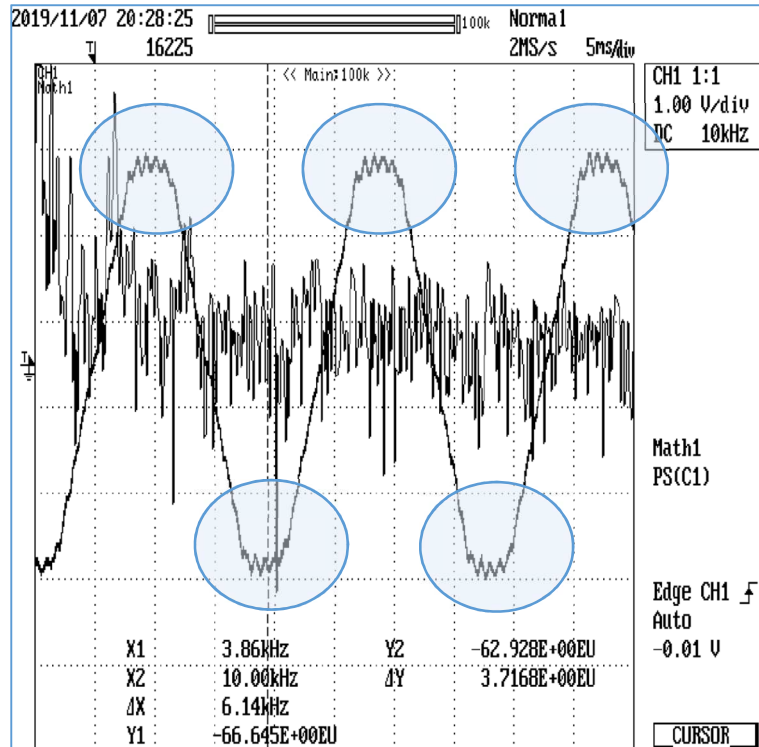


Fig. 151 :Señal de red de los alternadores en isla.Fuente:Propia.

En el análisis frecuencial de esta señal, se observa en la zona entre 1.700 y 1.900 Hz varios picos, que coinciden con la frecuencia de la distorsión de la senoide, detectada en el gráfico anterior.

Se amplía la zona de alta frecuencia de la señal de (ACEE):

Se pueden observar Fig. 152, 3 picos de amplitud considerable a las frecuencias de 1.760, 1.820 y 1.880 Hz.

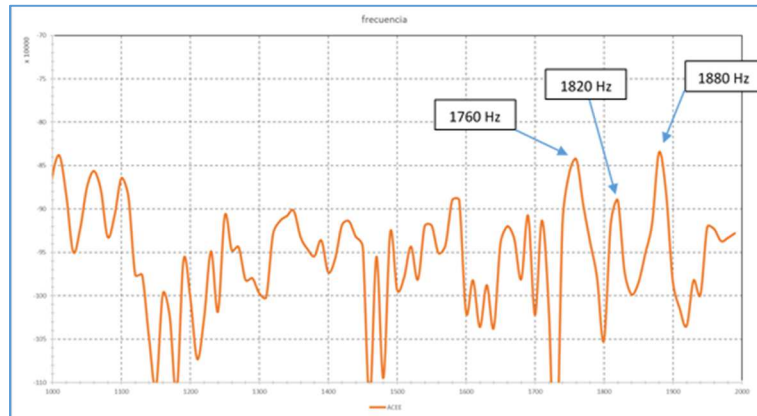
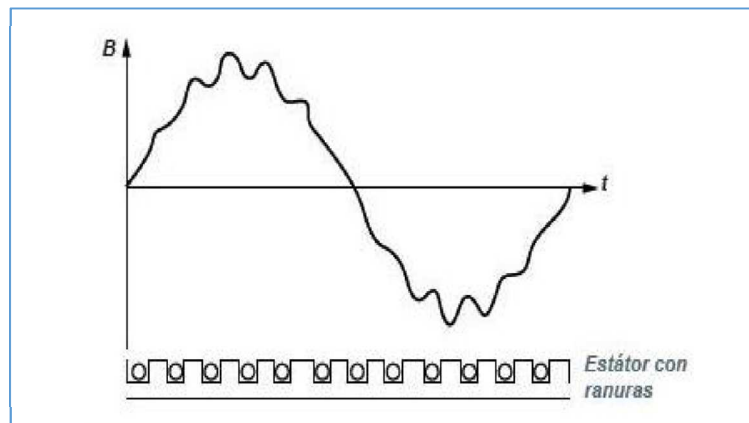


Fig. 152: Análisis Espectral Alta frecuencia señal. Fuente: Propia.

La explicación, podría encontrarse en las ranuras de los bobinados del estator. Esto es debido a que las ranuras están distribuidas de forma homogénea, a lo largo del perímetro del estator y causan una variación periódica de reluctancia y de flujo en la superficie del estator. (Circutor, 2015)

En la Fig. 153, se observa la variación de la densidad de flujo con relación al tiempo, su fluctuación es similar a la de la onda de tensión del generador. Se concluye que, la densidad de flujo es proporcional a la onda de tensión y es lo que se ve en la gráfica temporal del generador.



**Fig. 153: Tensión en bornes del alternador. Estator con sus Ranuras. Fuente: Circutor. <http://circutor.es/es/documentacion-es/articulos/3113-armonicos-de-ranura-en-sistemas-de-generacion-electrica>**

para calcular el orden del armónico generado en el generador, se utiliza la siguiente fórmula:

$$v_{ranura} = \frac{2 \times M \times S}{P} \pm 1$$

**Ecuación ( 46 ) Orden del Armónico.**

Donde:

$v_{ranura}$ : es el orden del armónico

$M$  : es el número entero con los que aparecen los armónicos de menor frecuencia, habitualmente es 1

$S$  : es el número de ranuras del estator

$P$  : es el número de polos de la máquina.

Suponiendo que  $S$  sea 36, valor bastante típico y aplicando la fórmula en este caso, se obtienen los siguientes resultados:

$$v_{ranura} = \frac{2 \times M \times S}{P} \pm 1 = \frac{2 \times 1 \times 36}{2} = 35 \text{ y } 37$$

**Ecuación ( 47 ) Cálculo del armónico.**

Sabiendo los órdenes generados en el estator, sólo queda multiplicarlos por la frecuencia fundamental, que en este caso es 50 Hz.

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

$$35 \times 50 = 1.750 \text{ Hz.}$$

$$37 \times 50 = 1.850 \text{ Hz.}$$

Los picos de alta frecuencia calculados, coinciden con los que se generan realmente en las ranuras de los bobinados del estator y las pequeñas diferencias entre los valores teóricos y los reales se pueden explicar, cómo la fluctuación de la frecuencia fundamental.

## A.2 ANEXO 2 ACTIVIDAD ACADÉMICA

### A.2.1 Publicaciones realizadas

#### A.2.1.1 “Engineering Failures Analysis”

En fecha 20/06/2020, fue aprobada para su publicación en la revista “*Engineering Failures Analysis*” del grupo “Elsevier”, el trabajo técnico-científico titulado: “***Contributions for improving the stability of marine power generation plants***” con la colaboración de los Doctores Ricard Bosch-Tous, Jesús Alvarez-Florez, Pau Casals-Torrens y Alexandre Serrano-Fontova, muy ligado con el propósito de este trabajo.

Se traslada aquí el “Abstract” del mismo:

*The Electrical Engineering department of the University FNB/UPC -Barcelona Tech. conducted a large set of real tests on a hybrid propulsion platform with compressed natural gas (CNG) fuel at the facilities of Marina Barcelona 92 in 2018, to simulate the electrical transients that may cause dangerous situations such as “Blackouts” in marine power generation plants.*

*The commercial generator set used in this hybrid platform is composed of a reciprocating alternative internal combustion engine of 91 kW and a synchronous alternator of 175 kVA and a set three squirrel-cage induction motors of different ratings (i.e., 20 kW, 22 kW and 55 kW). It should be underscored that, as can be seen, the rated apparent power of the synchronous generator has been slightly oversized when compared with the rated active power supplied by the prime mover. In fact, the latter is defined as one of the main criteria of this article.*

*As mentioned above, the synchronous alternator has been oversized, mainly to overcome the effects caused by the induction motors during its on-line starting, to fulfil smooth recovery while avoiding a general “blackout”. With this purpose in mind, one of the main goals of the article is to demonstrate that the proposed criteria are useful during severe transients, which are likely to cause undesired events in the ship.*

*The transient originated by the induction motors during the on-line direct starting causes large overcurrent. Therefore, by oversizing the alternator and adding more inertia to the electrical system (i.e., the electrical system of the ship), we achieve a better response during this contingency. Indeed, this design criterion has not been taken into consideration by the maritime sector, which most of them are only designed for the steady state at a particular point of operation. Therefore, this point stresses the fact that without considering this design criterion, the electrical system may become more vulnerable.*

*The aforementioned “Power Blackouts”, have historically produced numerous accidents (officially reported by the “Maritime Accident Investigation Commissions” of the most developed countries), sometimes associated with undesirable consequences.*

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

*A set of 5 technical recommendations and good practices has been studied and tested to improve the stability of the on-board electrical system.*

*Keywords: Power Blackout; Black Start; Stability of the Power Plants; Active Power; Reactive Power.*

*Abbreviations: Induction Motor (IM), Power Generation system Genset (GE), Reciprocating Internal Combustion Engine (RICE), Variable Speed Drive (VSD), Circuit breakers (CB), Brushless permanent magnet control for synchronous generator (PMSG), Compressed Natural Gas (CNG), Black Start Diesel Generators (BSDG).*

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104670>

<http://hdl.handle.net/2117/335247>



## Anexos

### A.2.1.2 “Ingeniería Naval”

Publicado en el número 1013 del mes de junio 2022, como artículo técnico del mes, 19 páginas el trabajo titulado:

#### **Generación eléctrica a bordo: Eficiencia, Control y Protección.**

#### **“Tres criterios aparentemente antagonistas que deben respetarse en el diseño”**

Este trabajo fue ya presentado en la Coruña en la ponencia del 60º Congreso de Ingeniería Naval e Industria marítima, con la colaboración del Dr. D. Ricard Bosch-Tous y de D. Joan Medes- García, del centro técnico de “SEAT”.

<<https://sectormaritimo.es/junio-2022>>

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

### A.2.2 Participación en congresos

A.2.2.1 Ponencia presentada en el 60º Congreso De Ingeniería Naval e Industria marítima”.20-22 octubre 2021, que tuvo por objeto principal “La Revolución Digital e Industrial”. La Coruña, Galicia. Faro de la innovación 2021, con la colaboración del Dr. D. Ricard Bosch-Tous y de D. Joan Medes-García, del centro técnico de “SEAT”.

La ponencia se tituló:

**GENERACIÓN ELÉCTRICA A BORDO: EFICIENCIA, CONTROL Y PROTECCIÓN.**

**“Tres criterios aparentemente antagonistas que deben respetarse en el diseño”**

Obteniendo una acreditación de participación.

<http://hdl.handle.net/2117/366318>

## Anexos

A.2.2.2 Ponencia presentada en el 9th International Conference on Maritime Transport MT22, 27-28 June 2022 Barcelona, con la colaboración del Dr. D. Ricard Bosch-Tous y de D. Joan Medes-García, del centro técnico de “SEAT”.

Presentación de ponencia en dicho congreso organizado por la Facultad de, Náutica de Barcelona (FNB/UPC), obteniendo la acreditación correspondiente.

El título es **“La generosidad con la energía reactiva, evita las caídas de planta eléctrica a bordo”**.

*“We have included all presented papers at the 9th International Conference on Maritime Transport (Maritime Transport IX): Barcelona, 27-29 June, 2022, issue 9, with DOI and URL link. You can access through the UPCommons webpage (<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/369187>) or directly at the MT22 webpage: <https://revistes.upc.edu/index.php/MT>.”*

## **“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

### A.2.3 Conferencias en Escuelas Técnicas, sobre la “estabilidad de las plantas eléctricas a bordo”

Durante el transcurso de este trabajo y como parte de la aportación que quería hacer a la sociedad, se han realizado charlas resumen de este estudio, con la colaboración del Dr. D. Ricard Bosch-Tous y de D. Joan Medes-García, del centro técnico de “SEAT”, en las escuelas de:

- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de Ingeniería eléctrica (DEE). 2019, 2020, 2021
- Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC), departamento de Ingeniería eléctrica (DEE). 2019, 2020, 2021
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Villanova i la Geltrú, departamento de Ingeniería eléctrica (ETSEVG/UPC). 2021.

A.3 ANEXO 3 ESQUEMAS Y PLANOS DEL SISTEMA (ACEE)

A.3.1 Esquemas eléctricos del sistema (ACEE)

Esquema eléctrico de maniobra 110 V.

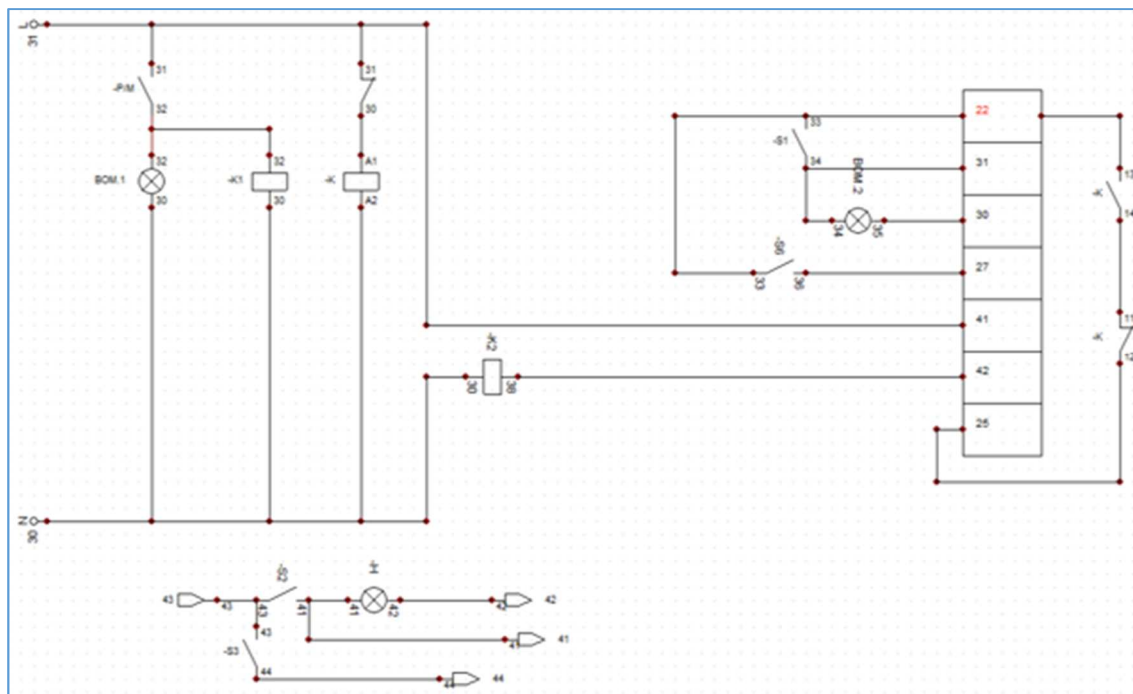


Fig. 154: Maniobra de contactores y panel de maniobra. Fuente: Propia

A.3.2 Esquemas eléctricos de potencia 400 V.

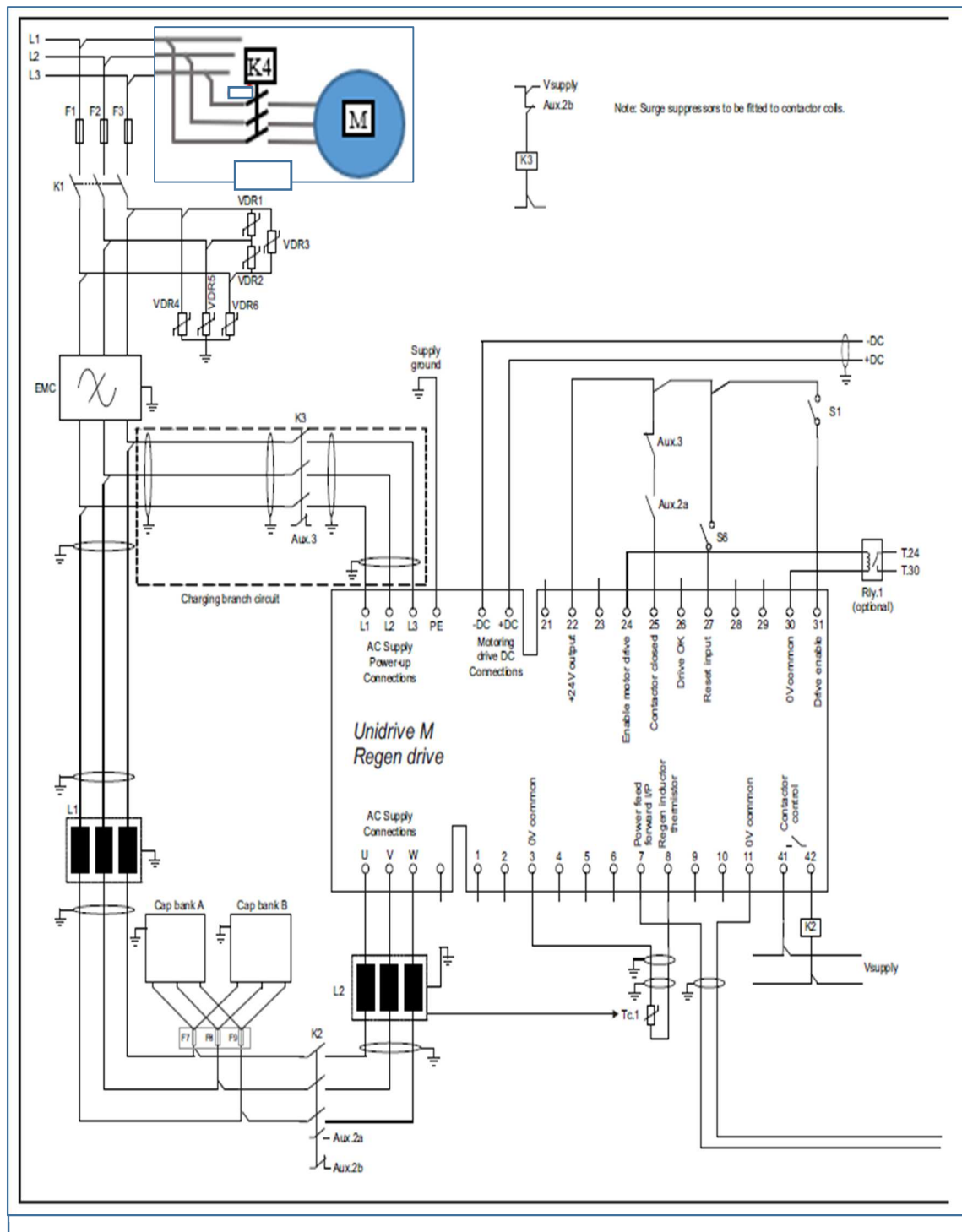


Fig. 155 Esquema de Potencia de Convertidores de Frecuencia, lado “Regen”. Fuente: Propia

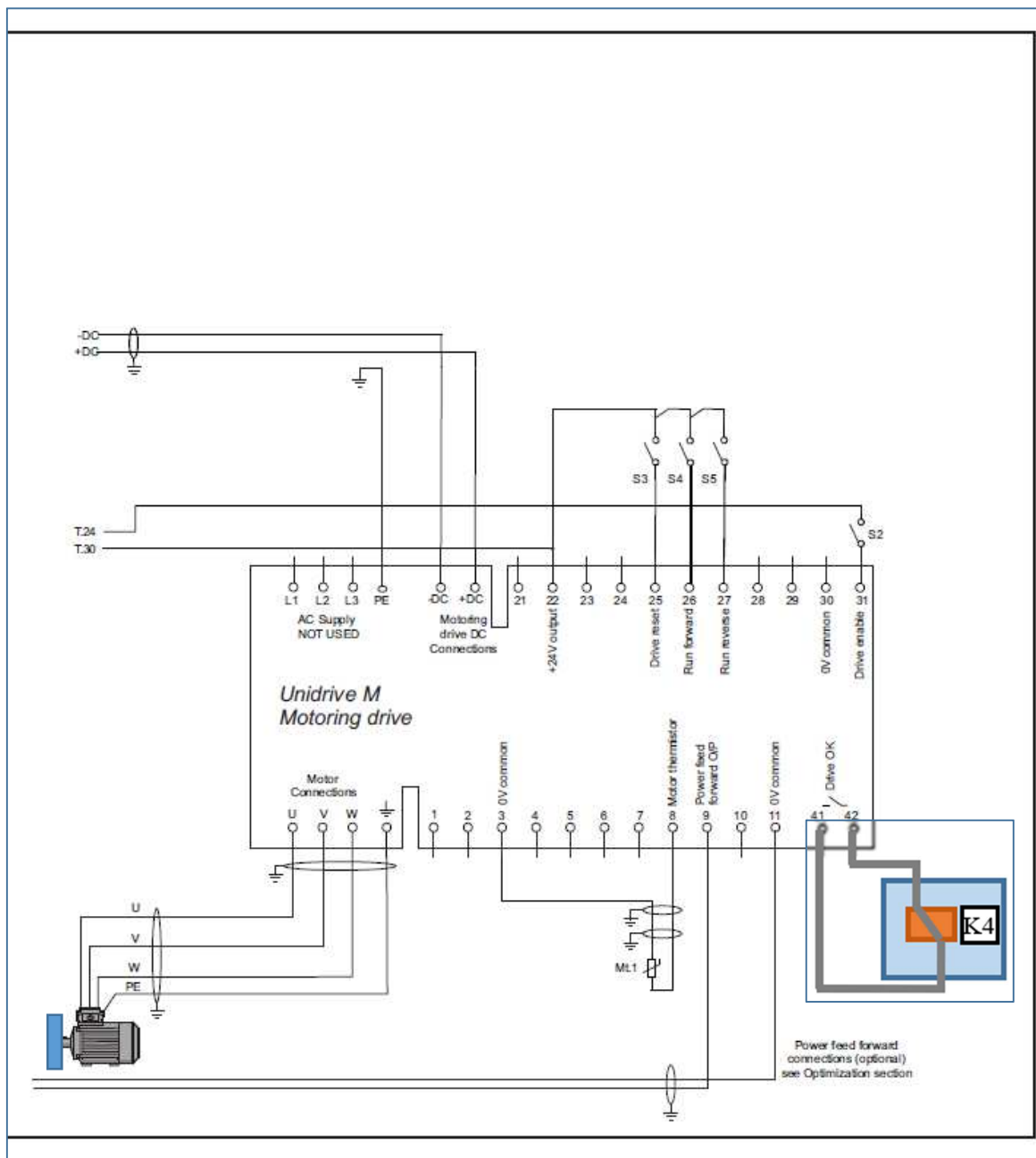


Fig. 156: Esquema de Potencia de Convertidores de Frecuencia, lado "Motoring". Fuente: Propia

A.3.3 Planos mecánicos del sistema (ACEE)

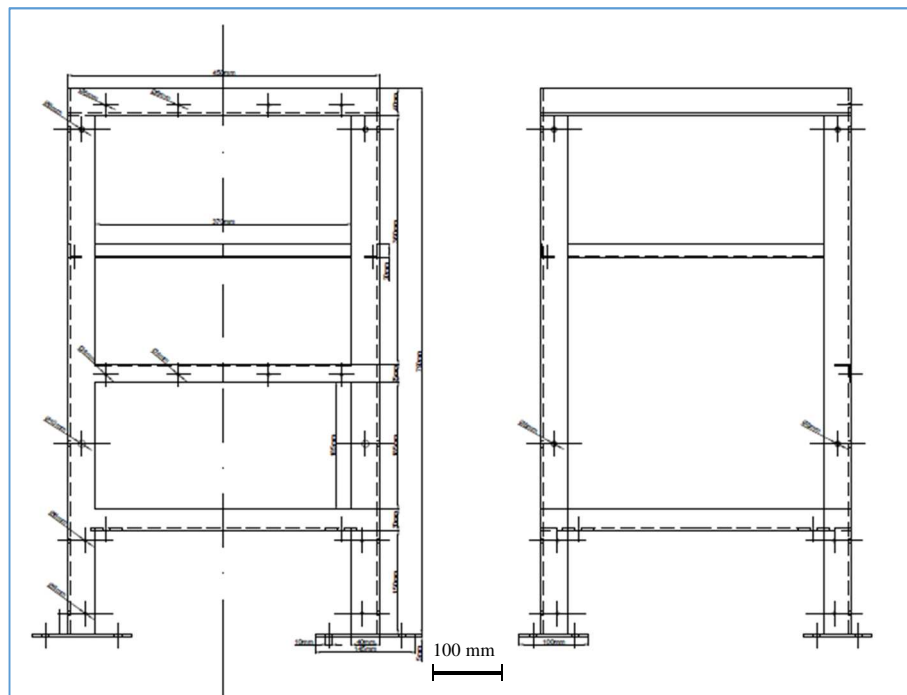


Fig. 157: Chasis del sistema (ACEE). Escala 1:10. Fuente: Propia



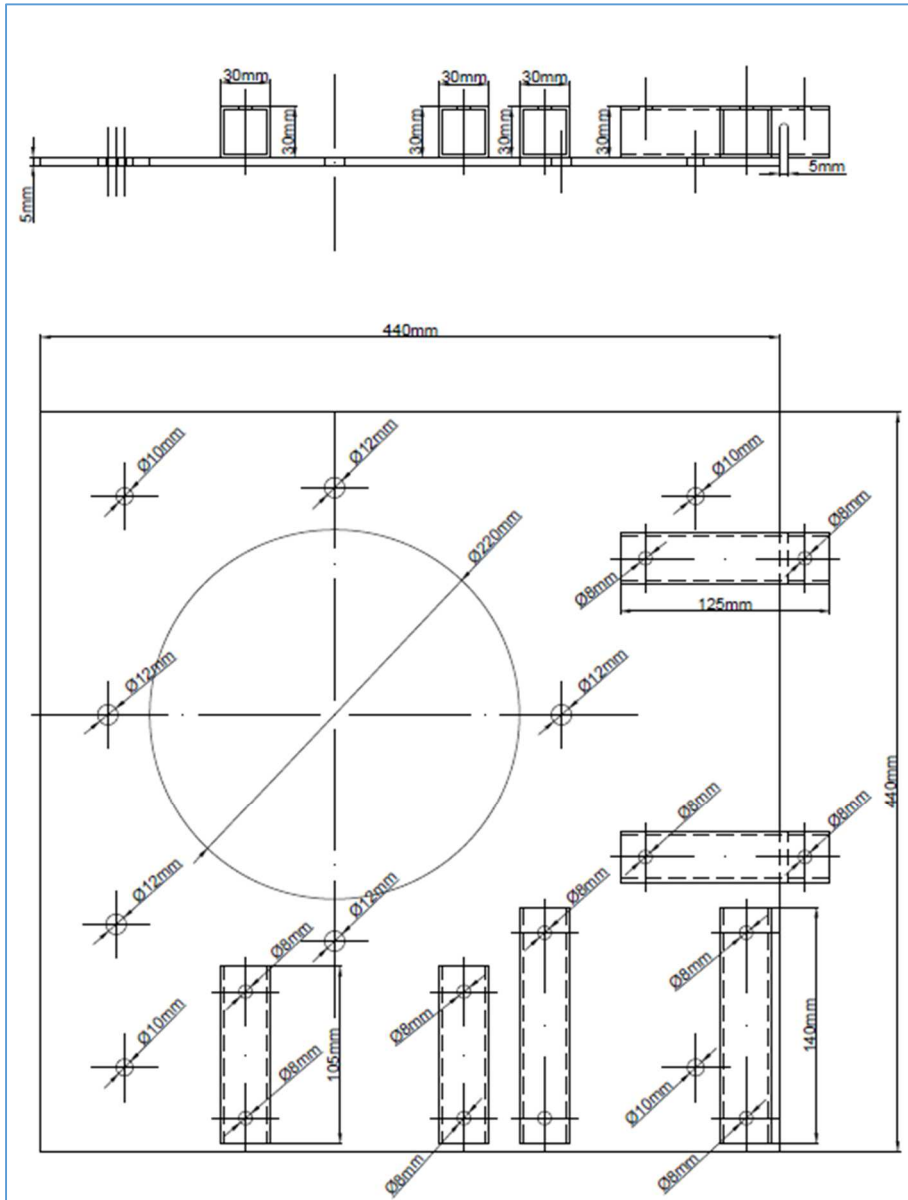


Fig. 158: Placa base soporte de motor y aparata. Escala 1:10. Fuente: Propia

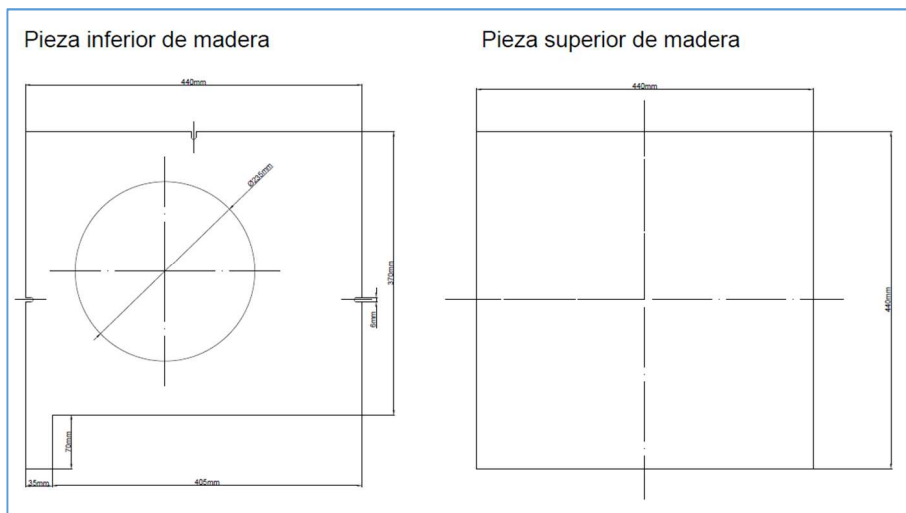


Fig. 159: Placas de madera inferior y superior. Escala :10. Fuente: Propia

#### A.4 ANEXO 4 OPERATIVA DEL SISTEMA (ACEE)

##### A.4.1 Guía de usuario. Procedimiento de arranque , desconexión y operación del sistema (ACEE)

###### Procedimiento de arranque del sistema (ACEE)

1. Verificar que los automáticos estén desconectados e interruptor en OFF
2. Arrancar el GE
3. Conectar el Schucco del (ACEE) al GE
4. Conectar tensión auxiliar (magnetotérmico encima de la mesa)
5. Dar tensión al (ACEE) (magnetotérmico (ACEE) 400V) Fig 159.
6. Dar tensión auxiliar (AUX 110V) Fig 159.
7. Cuadro de Control, interruptor P/M (detrás de los convertidores de frecuencia) Fig 160.



Fig. 160: Magnetotérmicos de puesta en marcha del (ACEE). Fuente: Propia

- a. Interruptor Habilitar Regen, observar que en la pantalla del convertidor de frecuencia Regen, pasa de INHIBIT a ACTIVE
- b. Interruptor Habilitar Motoring, observar que en la pantalla convertidor de frecuencia Motoring, pasa de INHIBIT a READY
- c. Observar que los indicadores debajo de las pantallas de los convertidores de frecuencia lucen ROJO fijo.



Fig. 161 : Interruptores de Habilitación y Reset del (ACEE). Fuente: Propia

8. Poner en marcha mediante el botón VERDE del teclado del convertidor de frecuencia Motoring
9. Observar que en su display indica 1500 rpm (parámetro 00.010) y en el del Regen 50 Hz (aprox) (parámetro 00.011)
10. Accionar el programa de Plc cargado mediante el interruptor magnetotérmico ( $\Phi \rightarrow$ ), una vez alcanzada la velocidad de régimen de 1500 rpm.
11. Si se desea arrancar el motor Novat manualmente, accionar el interruptor magnetotérmico (CARGAS)

###### Procedimiento de desconexión del sistema (ACEE)

1. Verificar que los interruptores “Motoring” y “Regen” estén en OFF (deshabilitados)
2. Interruptor P/M a OFF
3. Quitar tensión auxiliar (110V) [AUX] a OFF

## Anexos

4. Quitar tensión [ACEE (400V)] a OFF
5. Quitar conexión de tensión auxiliar (magnetotérmico encima de la mesa)
6. Parar el GE
7. Desconectar Schucco del GE
8. Desconectar cables entrada señal a Osciloscopio
9. Quitar tensión al osciloscopio (interruptor trasero)

A.4.2 Monitorización del sistema (ACEE)

1. Conectar el osciloscopio DL 1640 YOKOGAWA.
  - a. Recuperar la configuración de canales en la memoria #2 (SETUP / Store/Recall / Recall #2)
2. Conectar la entrada de la sonda de tensión /atenuadora SI-9000 (differential probe, escala 1:200, al bus DC directamente (acceso al bus DC del Motoring) y la salida al canal 1 del osciloscopio
3. Conectar el cable (Motor 1,5 mV/A) al canal 2. Corriente que consume el motor.
4. Conectar el cable (Genset 7,333 mV/V) al canal 3. Tensión en bornes del motor /línea de tensión del alternador del GE.
5. Conectar el cable (ACEE 1,5 mV/A) al canal 4. Corriente que consume el sistema (ACEE).

## A.5 ANEXO 5 CONTROL ELECTRÓNICO CON ALIMENTACIÓN MONOFÁSICA

### A.5.1 Deformaciones de la senoide provocadas por el control electrónico de cargas, con alimentación monofásica

Los convertidores de frecuencia (VSD) monofásicos, tienen un consumo de corriente pulsante, deformando las senoides de tensión y sobre todo de corriente, de los grupos de generación que los alimentan.

Para caracterizar este efecto, se han realizado ensayos con diferentes cargas y fuentes de alimentación.

Se ha elegido el convertidor de frecuencia (VSD):

- “ABB”, modelo ACS 150-01E-06 A 7-2,
  - 1,1kW, 230V, 16,1 A, 50 Hz, salida 6,7 A
  - Sobrecarga máxima disponible 150% (alimentación monofásica y salida trifásica)

y los Propulsores:

- Propulsor con reductor, “SEW-EURODRIVE”, 0,25kW, 1300/211rpm, 230/400V, 1,19/0,68A, i=6,16.
- Propulsor Ventilador, “SOLER & PALAU”, 0,75kW,1400rpm, 220/380V, 2,3A.

Como carga del Propulsor con reductor SEW-EURODRIVE” de potencia 0,25 kW, se utiliza una hélice de 3 palas batiendo aire (fuera del agua).

Todo el conjunto se ha alimentado, en monofásico, mediante:

- Red de potencia infinita, procedente de transformador 380/220 V, 50 kVA y  $I_{cc}=20 I_n$
- Grupo Electrónico, trifásico “RAS”, salida monofásica de 220 V. (4,6 kW motor térmico/ 8,5 kVA alternador).
- Grupo Electrónico, monofásico “HONDA inverter”, salida monofásica de 220 V. (2,2 kW/ 1,6 kVA alternador)

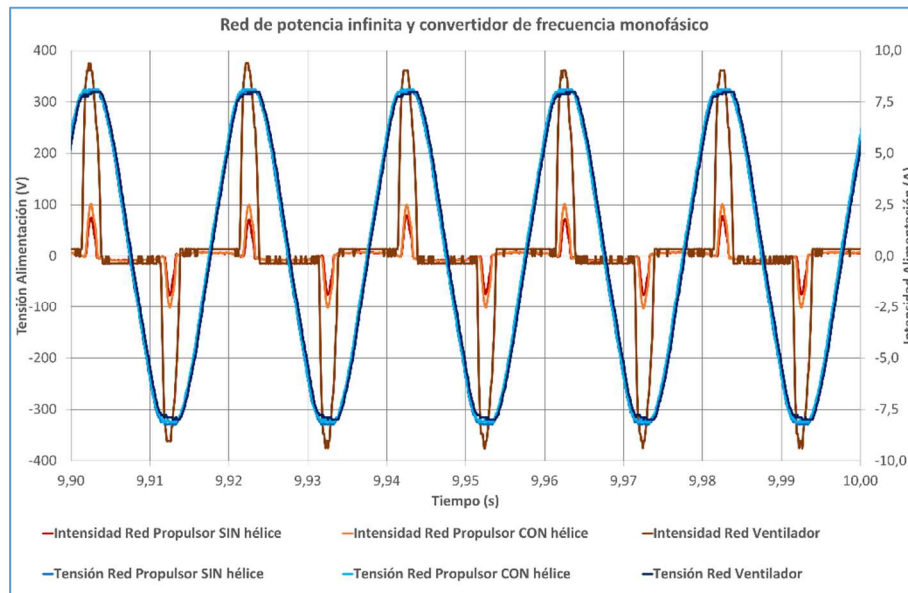
En resumen, son 3 tipos de alimentación para 3 montajes de motores, 1 en vacío y 2 en carga, total 9 grupos de ensayos, en los que se registran:

- Tensión de Red.
- Corriente de la carga.
- Corriente de excitación de alternador. (RAS)

Se muestran a continuación los registros obtenidos:

A.5.2 Fuente infinita (se toma como referencia):

- Propulsor con reductor de 0,25 kW SIN hélice.
- Propulsor con reductor de 0,25 kW CON hélice impulsando aire.
- Propulsor ventilador de 0,75 kW.



**Fig. 162: Red de potencia infinita y VSD monofásico. Tres Cargas diferentes, comparativa. Fuente: Propia**

La intensidad aumenta con la carga, en especial con propulsor ventilador que alcanza un valor de 9,1 A, pasando por un valor de 0,4 A en el caso de propulsor con reductor de 0,25 kW SIN hélice y de 2,4 A en el caso de propulsor con reductor de 0,25 kW CON hélice impulsando aire.

Su forma de onda es una pulsación, centrada en las zonas de máxima tensión, de la misma frecuencia y de amplitud, variable con el aumento de la carga.

El aumento de la carga, afecta levemente a la forma de onda de la tensión, presentando una pequeña distorsión, debida a la saturación del transformador.

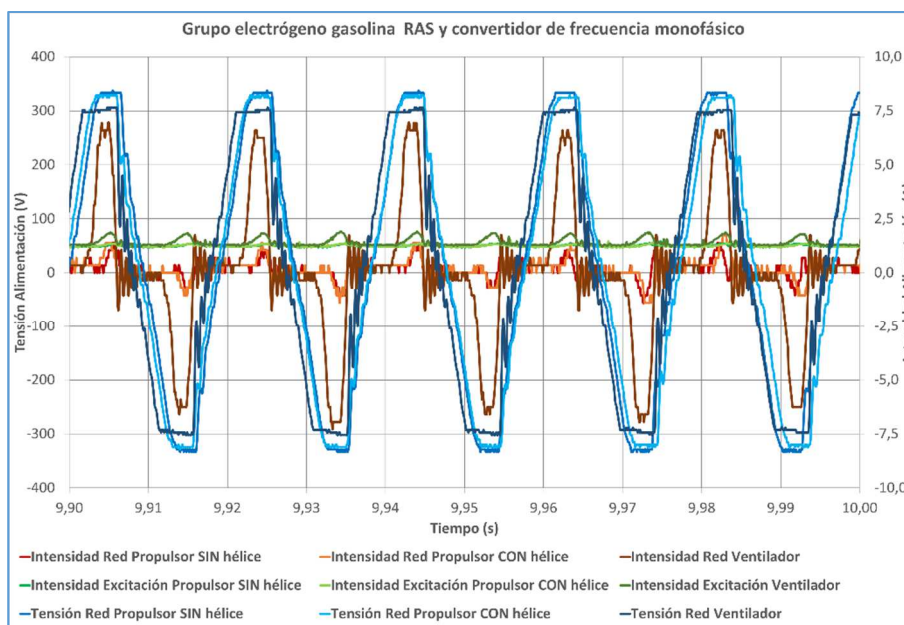
La corriente introduce una significativa distorsión de 150 Hz, correspondiente al tercer armónico de 50 Hz.

A.5.3 (GE)  $\cos\phi=0,5$ , 4,6 kW-8,5 kVA, “RAS” trifásico, con toma monofásica.

En este grupo, se dispone ya de un sensor para medir la corriente de excitación del alternador, es interesante medir y relacionar este parámetro con las variables anteriores, para poder estudiar la efectividad del sistema (AVR) frente a este tipo de cargas.

Se utiliza la salida monofásica del grupo electrógeno RAS, en los diferentes supuestos de carga:

- Propulsor con reductor de 0,25 kW en vacío.
- Propulsor con reductor de 0,25 kW con hélice impulsando aire.
- Propulsor ventilador de 0,75 kW.



**Fig. 163: Grupo electrógenos RAS (4,6 kW/8,5 kVA,  $\cos\phi=0,5$ ) y VSD monofásico. Tres Cargas diferentes, comparativa. Fuente: Propia**

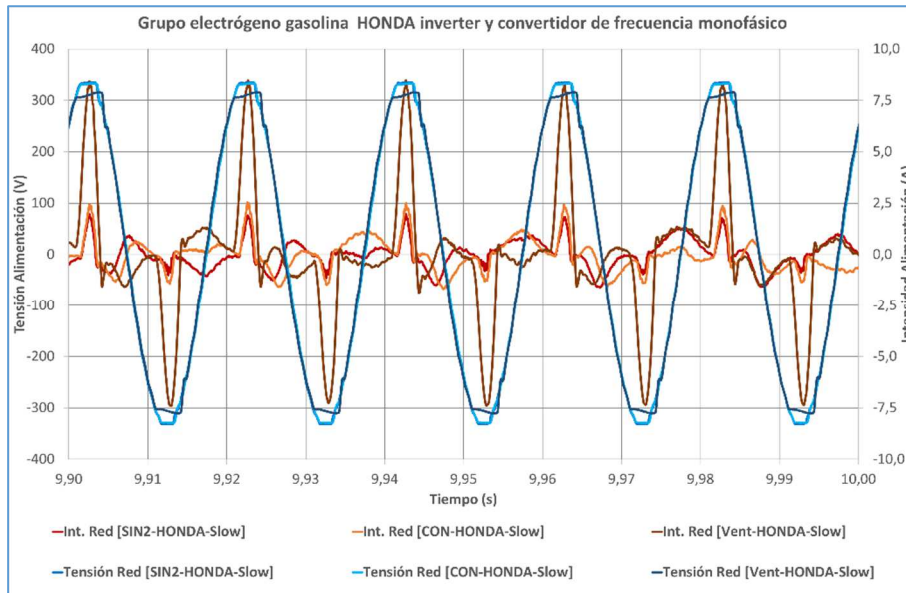
La intensidad aumenta con la carga, en especial con propulsor ventilador, su forma de onda es parecida pero mucho más deformada respecto al fundamental de 50 Hz alcanzando valores de 6,8 A, pasando por un valor de 0,8 A en el caso de propulsor con reductor de 0,25 kW SIN hélice y de 1,1 A en el caso de propulsor con reductor de 0,25 kW CON hélice impulsando aire.

Se observa, una importante deformación de la forma de onda de la tensión de salida. El alternador trifásico es de 8,5 kVA, dispone de un devanado reforzado y en el rotor de un devanado amortiguador, con una salida monofásica de 5 kVA. El consumo es un motor ventilador de apenas 0,75 kW.

La respuesta del regulador electromagnético de tensión del alternador (AVR), no es suficientemente buena para adaptarse a los consumos pulsantes, que demanda el convertidor de frecuencia para alimentar las cargas, provocando una importante deformación de la tensión de salida.

A.5.4 (GE)  $\cos\phi=1$ , 2,2 kW/ 1,6 kVA, “HONDA Inverter” 2000, monofásico.

- Propulsor con reductor 0,25 kW en vacío.
- Propulsor con reductor de 0,25 kW con hélice impulsando aire.
- Propulsor ventilador de 0,75 kW.



**Fig. 164: Grupo Honda inverter (2,2 kW/1,6 kVA) y (VSD) monofásico. Tres Cargas diferentes, comparativa. Fuente: Propia**

La intensidad aumenta con la carga, en especial con propulsor ventilador. Su forma de onda es distorsionada, de la misma frecuencia fundamental y de amplitud, variable con el aumento de la carga, alcanzando un valor de 7,9 A. Se alarga a un valor de 1,9 A en el caso de propulsor con reductor de 0,25 kW SIN hélice y de 2,3 A. En el caso de propulsor con reductor de 0,25 kW CON hélice impulsando aire.

La forma de la senoide de tensión, es mejor que con el GE RAS, aunque la potencia es menor, debido al tipo de regulador de tensión (AVR), que en este caso es electrónico, mejorando el tiempo de respuesta, con una menor distorsión de la onda de tensión a consumos elevados.

El resumen de valores de corrientes de arranque, se muestra en la tabla 32:



**Tabla 32 Corrientes de arranque de tres tipos de motores carga, con tres fuentes de alimentación diferentes.**

<b>Carga</b>	<b>Fuente Infinita</b>	<b>GE, <math>\cos\phi=0,5</math>, RAS 4,6 kW/8,5 kVA</b>	<b>GE, <math>\cos\phi=1</math>, HONDA Inverter 2,2 kW/1,6 kVA</b>
Propulsor con reductor 0,25 kW en vacío.	0,4 A	0,8 A	1,9 A
Propulsor con reductor de 0,25 kW con hélice impulsando aire.	2,4 A	1,1 A	2,3 A
Propulsor ventilador de 0,75 kW.	9,1 A	6,8 A	7,9 A

## A.6 ANEXO 6 CARGAS REGULADAS EXTERNAMENTE

### A.6.1 Cargas reguladas por convertidores de frecuencia (VSD) externos, alimentados por el bus dc del sistema (ACEE)

Se podría dar el caso de que, en alguna aplicación como la propulsión Diesel-Eléctrica, se requiriera una cadena energética formada por un sistema (ACEE), trabajando en apoyo de un grupo electrógeno GE y unas cargas reguladas mediante convertidores de frecuencia externos (VSD), diferentes de los del sistema acumulador, alimentados por este mismo.

La configuración de este caso, la forman dos sistemas, por una parte, el (ACEE), con sus dos convertidores de frecuencia de la marca “Control Techniques” y por otra, los motores de inducción, cargas de propulsión de la embarcación, reguladas por otros dos convertidores de frecuencia (VSD), de la marca “Omron”.

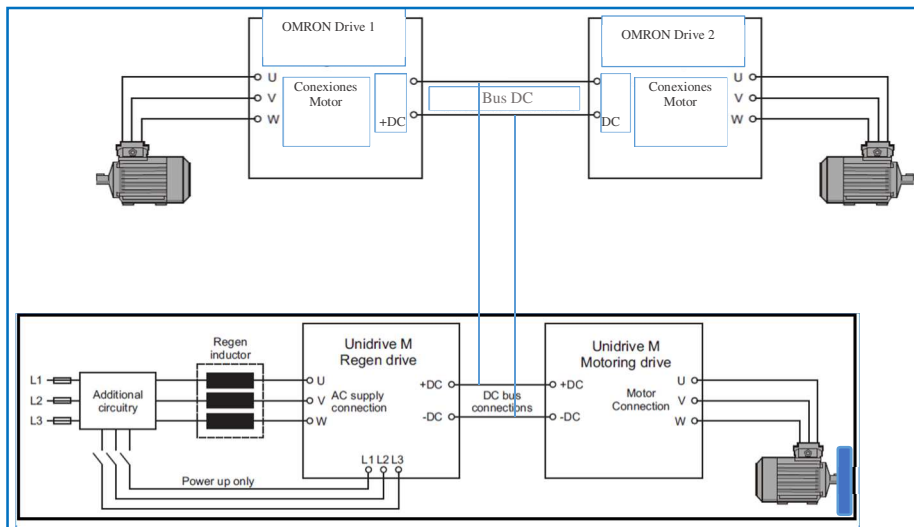
Estos (VSD), se han instalado sobre el mismo chasis mecánico del sistema (ACEE), regulando cada uno sus propias cargas y alimentándose ambos del Bus DC del sistema (ACEE).

Se estudian las interferencias electromagnéticas y/o conflictos, entre los bucles de regulación de velocidad y de corriente de los diferentes (VSD), que pudieran provocar un mal funcionamiento del sistema.

Los convertidores de frecuencia instalados son de la marca Omron, con características:

- Modelo: 3G3MX2-A4110-E
- Alimentación: 3ph, 400 V o 600 V DC
- $I_{\text{nominal}}$ : 31 A
- Potencia: 11/15 kW, 150%/115% de sobrecarga.

El diagrama de bloques de esta instalación, se muestra en Fig. 165:



**Fig. 165: Diagrama de bloques de un Sistema Regenerativo (ACEE), alimentando dos convertidores de frecuencia desde su Bus DC. Fuente: “Control Techniques” y Propia**

Para verificar el buen funcionamiento de los convertidores de frecuencia “Omron”, las primeras pruebas se hacen con alimentación directa de 400 V AC, sin conexión con el sistema (ACEE), siendo el funcionamiento de ambos equipos (VSD) correcto.

Posteriormente, se alimentan ambos convertidores de frecuencia (VSD) “Omron” desde el Bus DC del sistema (ACEE) y se conecta el motor Novat como carga. Aunque este motor trabaja en vacío, resulta significativo para el análisis de los transitorios de arranque.

Para proteger los (VSD) conectados mediante el Bus DC, se instalan fusibles ultrarrápidos de 50 A en el mismo, según se muestra en la Fig. 166:



**Fig. 166: Montaje de dos convertidores de frecuencia marca Omron de 11/15 kW, alimentados del bus DC del sistema regenerativo (ACEE). Fuente: Propia**

Se pretende registrar, tal como se muestra en la Fig. 167 y 168, la variación del Bus DC, con el arranque del propulsor Novat, y el sistema (ACEE) conectado y sin descargar, alimentado por fuente de potencia infinita y por grupo electrógeno GE, con  $\phi=0,5$ , RAS trifásico, 4,6 kW / 8,5 kVA.

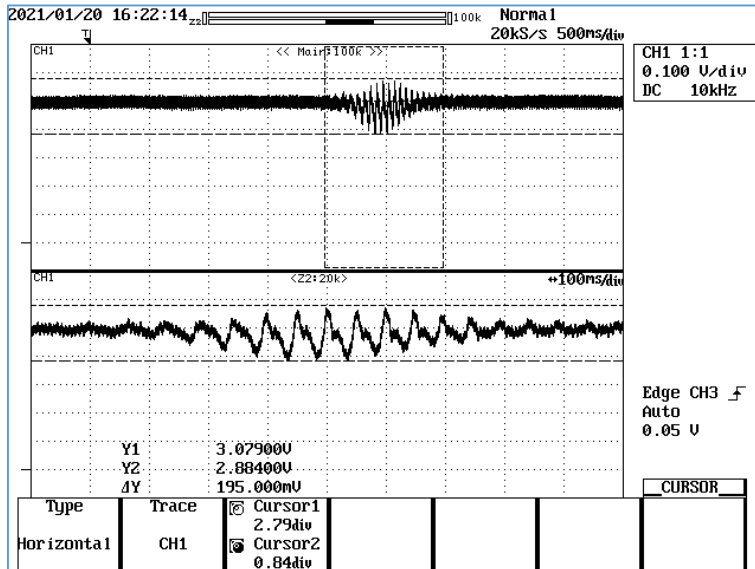


Fig. 167: Registro de la variación del Bus DC, en el arranque en vacío, del propulsor Novat 4 kW, regulado por convertidor de frecuencia “Omron” 11/15 kW (2 s), alimentado por el Bus DC del sistema (ACEE), que a su vez esta alimentado de red de potencia infinita. Fuente : Propia

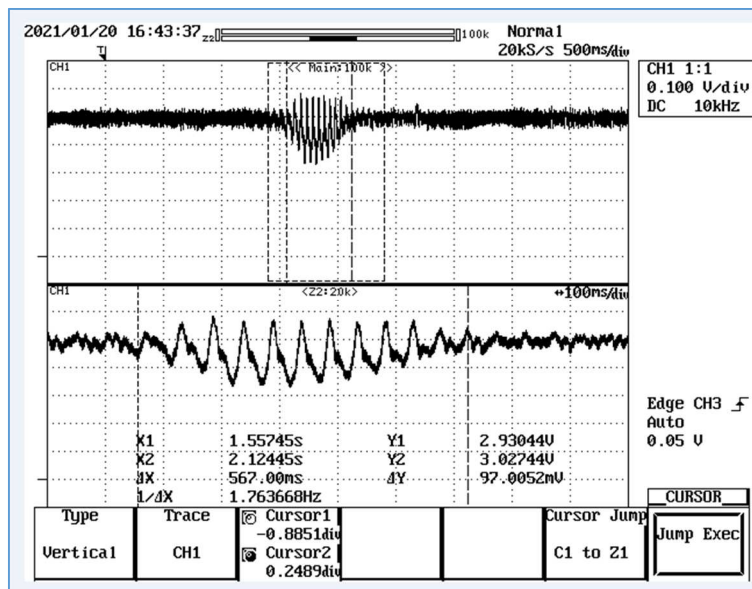


Fig. 168: Registro de la variación del Bus DC, en el arranque del propulsor Novat, regulado por convertidor de frecuencia Omron 11/15 kW (2 s), alimentado por el Bus DC del sistema (ACEE) que a su vez está alimentado del GE RAS. Fuente: Propia

## Anexos

De los ensayos realizados se concluye:

- **Fuente de potencia infinita:**
  - El nivel medio de tensión del Bus DC, no se ve alterado significativamente, por la puesta en marcha de la carga en vacío y resulta independiente de su duración.
  - Se observa una perturbación del Bus DC, de duración proporcional al tiempo de aceleración de la carga.
- **Fuente GE RAS,  $\cos\phi=0,5$ , 4,6 kW/ 8,5 kVA:**
  - Comportamiento similar al caso de fuente de potencia infinita. La amplitud de la perturbación y su duración resultan mayores, debido a la menor corriente máxima del alternador frente a la red de potencia infinita.

Destaca el buen funcionamiento del sistema, se observan pocas interferencias, de los bucles de control, de velocidad y de corriente con el sistema (ACEE). La reducción de armónicos, también resulta significativa, debido a que no hay etapa rectificadora, ya que su alimentación es directamente desde el Bus DC.

Los resultados muestran un correcto funcionamiento del sistema, sin interferencia entre los diferentes convertidores de frecuencia (VSD), que es lo que se quería visualizar.

## A.7 ANEXO 7 ANTECEDENTES EXPERIMENTALES. PROYECTOS DE REFERENCIA

Esta tesis, se enmarca en una línea de trabajos dirigidos por el Dr. Ricard Bosch-Tous durante casi 40 años de trabajo, para explorar aplicaciones de máquinas eléctricas sometidas a fuertes aceleraciones, que permitan mejorar su tecnología.

Las máquinas eléctricas de mercado, están diseñadas para trabajar principalmente, en régimen continuo e isotérmico S-1, es decir en equilibrio con una temperatura ambiente dada.

Los sistemas (ACEE) deben trabajar arrancando y frenando continuamente, es decir con todos sus parámetros electromecánicos variando constantemente. Trabajan pues en un régimen transitorio y adiabático, servicios S-5 a S-8, jugando con la inercia térmica de las máquinas eléctricas.

Las nuevas máquinas eléctricas para los sistemas (ACEE) S-5 a S-8, deben tener características constructivas diferentes a los motores diseñados para servicio S-1: con menos impedancias internas, fricciones, consumos en vacío...y mayores corrientes de arranque, cortocircuito, capacidad de refrigeración, robustez mecánica, térmica, electromagnética, dieléctrica....

Estas nuevas máquinas eléctricas, tienen aplicaciones y mercados diferentes a los convencionales, requiriendo sofisticados sistemas de control, adaptados a la aplicación, potencia y energía concretos.

Se ha trabajado durante años, mejorando aspectos constructivos de los servomotores de baja inercia, por ser lo más parecido al servicio de trabajo S-8, centrándose en la geometría y prestaciones del servomotor fabricado por “Mavilor”, del grupo “Infranor Inter AG”, concretamente el MA-55.

La presente tesis doctoral abre otra línea de trabajo, que incluye los controles electrónicos con convertidores de frecuencia (VSD), de motores convencionales de inducción, lastrados con volante de inercia. Se toma como referencia la aplicación de “Prensas ARISA” 100% eléctricas, con motores de alta inercia de “Siemens”.

La aplicación Naval de esta tecnología, desarrollada para las prensas de estampación en frío de acero, es un claro ejemplo de “demanda temprana”, donde el usuario Naval no sabe todavía, lo que puede exigir al sector de la construcción de propulsión eléctrica híbrida.

Se ha demostrado experimentalmente que los sistemas (ACEE), pueden evitar algunas caídas de planta.

En trabajos futuros, se espera demostrar el ahorro de combustible, asociado a la instalación de sistemas (ACEE) y sus tecnologías asociadas de máquinas eléctricas, en barcos de propulsión eléctrica híbrida, navegando con mal tiempo, con estabilización o posicionamiento dinámico.

Históricamente se ha planteado una estrategia de PFC, TFE y Tesis Doctorales, que exploran experimentalmente los diferentes aspectos de las máquinas eléctricas y sus aplicaciones en tracción de vehículos:

- En 1998, Ricard Bosch-Tous, presenta su tesis doctoral, sobre motores eléctricos de inducción, de flujo axial y rotor conductor de aluminio, aplicable a los sistemas (ACEE). Se consigue trabajar sin cojinetes convencionales y con levitación electromagnética del rotor, que disminuye drásticamente sus fricciones y reactancias internas.
- En paralelo se ha iniciado una labor de reciclado de material industrial, apto para mejorar la capacidad de ensayo del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, ETSEIB/UPC. Colaboran decenas de estudiantes de ingeniería industrial de TFE, trabajando en el laboratorio al estilo de los talleres de formación profesional. Los equipos más significativos son:
  - 3 soldadoras por puntos, donados por “SEAT”, forman un equipo capaz de ensayar a 50 Hz, con corrientes de 25 kVA en régimen permanente a 15V, refrigerados por agua directa por dentro del conductor tubular.
  - Varios equipos de alta tensión donados por “LABORATORIO ELECTROTÉCNICO” y “AISMALIBAR”. Permiten ensayos hasta 500 kV, 50 Hz y realizar ensayos de impulsos tipo Rayo, en tensión hasta 1.600 kV, 1,2/50 microsegundos, 10 K Joul, en corrientes hasta 100 kA, 8/20 microsegundos, 80 K Joul.
- Se detallan a continuación algunos trabajos previos a esta tesis, que se consideran significativos y relacionados:
  - Refrigeración forzada por agua del servomotor MA-45. 1998 PFC Elisenda Vives ensaya el MA-55, con refrigeración indirecta por agua en las cabezas de las bobinas y núcleos magnéticos. Confirma los indicios de las excelentes prestaciones transitorias electromagnéticas del MA-55, observadas en trabajos anteriores.

Caracteriza el MA-55 en los diferentes tipos de servicio contemplados. Evidencia las dificultades de la extracción de calor por refrigeración indirecta, es decir a través de los aislantes de los conductores. El prototipo como generador, se instala en un “SEAT Ibiza”, eléctrico híbrido, propulsado por otro MA-55 con otro sistema de refrigeración indirecta por agua.

Se ensaya sobre banco de rodillos en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, ETSEIB/UPC y en “SEAT” Martorell. No pasa de 80 km/h, por falta de tensión suficiente en el Bus DC, gobernada por las baterías de



Pb. Al ser un motor de imanes permanentes, no puede superar la F.C.E.M. del motor tractor, a velocidades superiores a los 80 km/h.

- Se inicia una línea de tesis doctorales (Joan Pallarés-Viña, Joaquim Lloveras-Valls i Adrián Gonzalez-Parada), con materiales superconductores, basados en la geometría electromagnética del MA-55. Se evidencian las dificultades de refrigeración con nitrógeno líquido, que son similares a las observadas con la refrigeración indirecta con agua. Se decide empezar a explorar la refrigeración directa, es decir la que implica el contacto directo del refrigerante con el conductor o soporte de cobre.

Eso exige cambios de raíz en la geometría de los bobinados y núcleos magnéticos, para que puedan ser tubos de cobre aislados por fuera y refrigerados por dentro.

- El vehículo electro solar “Despertaferro”, (Bosch-Tous, Ricard, Pifarre-Martinez, David, Orús-Valls, Joan, Planas, Arnau, Ferrero-Aragones, Eduard, Puig-Mas, Francesc, Raurich-Molinas, LLuis, Morato-Guell, Moisés, Calaf-Centellas, Oriol, Fonseca-Casañas, 2005) demuestra en competición las prestaciones del MA-55 sin refrigeración forzada por agua, participando en la “Sunrace 2000”, consiguiendo la *pole position* por su excelente aceleración.

“Sunrace” es una carrera anual que transcurre entre las ciudades de Sídney y Melbourne, a través de Camberra y Melbourne de unos 1.800 km de recorrido diseñada para poner a prueba nuevas tecnologías en vehículos solares. La competición tiene 8 etapas de 300 km, que tienen una duración de 11 días,

“Despertaferro” Fig. 169, construido por un grupo de estudiantes de Ingeniería Industrial de la UPC “Universidad Politécnica de Cataluña”, “Equip Mediterrani”, dirigidos por nuestro director el Dr Ricard Bosch-Tous, patrocinado por las empresas: “SEAT”, “MAVILOR”, “ISOFOTON” Y “LEASE PLAN”, entre otros.

El vehículo tiene 6 m de longitud y 8 m<sup>2</sup> de placas solares y alcanza una velocidad punta de 105 km/h; equipado de tres ruedas, y con un peso de 240 kg, rodó a una velocidad media de 50 km/h.

Quedaron en 6<sup>a</sup> posición sobre 11 participantes, finalizando las 6 etapas con un total de 1.790 km.

“Despertaferro”, está actualmente en la exposición permanente de automoción de



Fig. 169: Vehículo Electro Solar “Despertaferro”. Fuente: Ricard Bosch-Tous



Cataluña, museo de la Ciencia y la Técnica de Terrassa. Barcelona.

Estaba equipado de un servomotor de imanes permanentes de CA, con control de la firma “Infranor”, modelo MA-55, con intensidad nominal  $I_N$  25 A e intensidad máxima  $I_{peak}$  de 190 A, con una constante  $K_t$  de 1 Nm/A y (VSD), alimentado directamente el Bus DC, desde baterías, con tensión base de alimentación de 216 V DC.

Se evidencian las limitaciones de las baterías, en los transitorios de aceleración, a pesar de estar mejoradas respecto a las del “SEAT Ibiza”, construido anteriormente y ensayado en banco de rodillos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB) y Centro Técnico de SEAT, Martorell.

Los arranques en alguna rampa del vehículo electro solar de competición, provocaban huecos de tensión que bloqueaban al control, dificultando el apurar el último 30% de las baterías.

“Despertaferro” en Australia, llevaba 18 baterías de Pb gel conectadas en serie, de la marca “YUASA”, de 12 V, 7 A/h y resistencia interna serie de 0,05  $\Omega$  de cada batería con carga al 100%. Esta resistencia interna aumentaba hasta 0,5  $\Omega$  con las baterías cargadas al 30%.

- “SEAT 600” híbrido. Se mejoran las baterías respecto al “Despertaferro”, se añade un motor DC serie 110V, para explorar la alimentación desde grupo electrógeno + Rectificador. Se observan mejoras importantes en los transitorios de arranque, al ser menores las resistencias internas de las fuentes de electricidad y no variar en el tiempo con el estado de la carga (SOC) como en las baterías.

Se ensayan en banco de rodillos los arranques del motor DC 110V, alimentando desde un sistema (ACEE) con un motor Mavilor DC , MSS-4, construido para la tesis de Ramon Garrigosa García.(Garrigosa García, 2017)

- TFC, Jorge Alfonso Lorenz.

Los resultados evidencian la superioridad tecnológica de los sistemas (ACEE), respecto a las baterías, para el arranque violento de motores DC. También las dificultades para el control de las máquinas implicadas.

Se abre una línea de exploración de la transferencia de calor directa, cobre-agua, para aprovechar los calores residuales de los gases de escape del grupo electrógeno. Los tubos de cobre de la recuperación de calor son de diámetros similares a los que se usaran para explorar la refrigeración directa de máquinas eléctricas.

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Tesis de Víctor Fuses 2010, TFM de Francisco Moreno del Valle, Marcel Martí Tubet.

- En 2010, las tesis doctorales de Ricard Barba Martí y Ramon Garrigosa, analizan la problemática energética del frenado regenerativo ferroviario. En el 2017 Ramon Garrigosa García la termina. Ha trabajado la aplicación Ferroviaria de los sistemas (ACEE) y esboza su aplicación a la tracción Naval eléctrica.

## Anexos

En el año 2005 se pasa a explorar la propulsión naval.

Se empieza por una embarcación de competición de motonáutica tipo “PR600” de 4,5 m de eslora, llamada “RAS”, en honor a Enrique Ras Oliva, catedrático de electrotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), de finales de 1900.

TFC Albert Peregrina Velasco de la Facultad de Náutica de Barcelona, FNB/UPC y Carles Bou de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, ETSEIB/UPC:

Se separa la alimentación de los propulsores alimentados desde grupo electrógeno III, de los controles y sistemas de medida, alimentados desde una red independiente de baterías a 12 V DC.

Se inicia un concienzudo trabajo experimental, en la línea de la jerarquización de las cargas: Críticas, Esenciales, Principales, Interrumpibles y Excedentes.

RAS está equipada con dos motores de inducción para su propulsión de 2,2 kW, 400 V, sumergibles IP68, cada uno, con hélice directamente acoplada. Un grupo electrógeno de 6,5 kVA 400 V. trifásico alimenta estos dos motores, controlados por un convertidor de frecuencia (VSD) o por mando directo con contactor.

En los primeros ensayos, el arranque simultaneo de los dos motores propulsores, calaba a menudo al grupo electrógeno de 6,5 kVA, concluyendo que era un problema de falta de potencia reactiva. A partir de este grupo electrógeno comercial, se construye un GE especial de 4,6 kW maquina térmica y 8,5 kVA de alternador, es decir una talla menos de máquina térmica y una más de alternador.

Este conjunto puede alimentar en permanencia una carga de  $\cos\phi=0,5$ , también permite el arranque directo y simultaneo de los 2 propulsores.

Se miden arranques directos del propulsor en dos décimas de segundo, lo que facilita hacer maniobras de la embarcación con fuertes aceleraciones, asociadas a transitorios eléctricos severos, que son los que se pretende estudiar.

La embarcación “RAS”, se ensayó en agua dulce abrigada evidenciando sus limitaciones operativas. Siendo una embarcación de planeo le faltaba potencia. El paso de las hélices pequeño para disponer de empuje, limitaba la velocidad a 5 nudos (2,5 m/s). Era posible embarcar dos personas durante los ensayos para separar las funciones de pilotaje y medida, pero se penalizaba mucho el asentamiento.

La embarcación “LADY” pretende mejorar algunos aspectos de la RAS, para continuar la experimentación de las diversas cadenas energéticas en las que se trabaja.

## “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”

La embarcación de la marca “Sea Ray” de 6,5 m de eslora, sufrió un incendio en el puerto de Blanes y posteriormente fue donada a la asociación de patrones de yate “APY en el año 2000, para experimentar sobre propulsión naval eléctrica híbrida, encontrándose actualmente en fase de reconstrucción, en el astillero del Instituto de Náutica de Barcelona “INB”.

Existe un acuerdo de colaboración firmado entre la asociación de Patrones de Yate (APY), el Instituto Náutico de Barcelona (INB), la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB/UPC) y la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC).

Esta reconstrucción está siendo realizada en base a economía de trueque y reciclaje de materiales, contando con la mano de obra de los estudiantes de (FP).

Se toma como referencia la gama de grupos electrógenos trifásicos más pequeños del mercado, actualmente tiene montado un GE Hyundai Diesel insonorizado comercial de 6,5kW/6,5 kVA 3ph 400V,  $\cos\phi=1$ , que puede desplazarse longitudinalmente 4 mts, sobre raíles, para optimizar la posición del centro de gravedad.

Se pretende legalizar como embarcación portuaria de servicios, o ensayarla como embarcación amarrada al muelle cautiva, con la cadena energética de RAS. Se requiere realizar pruebas reales de nuestro sistema (ACEE), haciendo oscilar la embarcación en escora, para estudiar las cargas eléctricas oscilantes y periódicas.

## Anexos

### A.8 ANEXO 8 COSTES DEL SISTEMA (ACEE)

#### A.8.1 Valoración económica del prototipo (ACEE)

Esta valoración ha sido realizada conjuntamente con nuestro colaborador, el Sr Antoni Durán Pascual, que participó activamente en la construcción del prototipo (ACEE) 7,4 kJ/25 A, para su TFG (Duran-Pascual, 2020).

La construcción del sistema (ACEE), ha tenido un coste que se desglosa y valora a continuación, en los siguientes apartados:

- Costes de Materiales. (No se incluye el pequeño material)
- Costes de Ingeniería. (Diseño, Construcción y Ensayos)

**Tabla 33 Valoración Económica. Materiales y Costes de Ingeniería.**

Concepto	Cantidad	Coste €/Ud	Coste €/Total
Unidrive M701 - 11kw Heavy Duty, 27A. 380/480VAC	2	1.124,4	2.248,8
Teclado avanzado con pantalla LCD en varios idiomas	2	38	76
Cable aislado conversor, USB 485	1	104,8	104,8
Regen Inductor	1	255,85	255,85
SFF Inductor	1	222,25	222,25
SFF capacitor	1	37,1	37,1
Varistors line to line	3	4,9	14,7
Varistors line to ground	3	4,9	14,7
Motor 4P LSES 160MR 9kW IFT/IE3 V1 380D/400D/415D/690Y-460D 50-60Hz	1	926,1	926,1
Chint NC1 – 4011 – 240 V contactor General, 240 V, 40 A, AC3, 3 + 1 N/O 1 N/C AUX y principales	4	69,82	279,28
Cofan 51004010M Cable, Marrón, 1 x 6 mm, (1 m)	50	1,01	50,5
Cofan 51002554M Cable, Marrón, 1 x 1.5 mm, (1 m)	15	0,29	4,35
Shunt 6pcs Universal Rocker Toggle Switch AC250V 10 <sup>a</sup> , Interruptor de palanca basculante	1	9,99	9,99
Siemens 5sl6 - Automático magnetotérmico 400v 6ka 3 polos c 20 <sup>a</sup>	2	39,9	79,8
Siemens 5sl6 - Automático magnetotérmico 400v 6ka 4 polos c 10 <sup>a</sup>	1	33,8	33,8
Transformador de mando y separación Murrelektronik MST Multispannungsbereich - 86145	2	74,17	148,34
ULTNICE 5mm Ronda Ultrabrillante Diodo Emisor de Luces LED - 5 Colores [Clase de eficiencia energética A]	1	0,07	0,07

**“Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia”**

Caja de conexiones con tapa abisagrada (240 x 190 x 90 mm), de plástico PVC, IP56	1	13,19	13,19
BOJACK Resistor 1% 1/4W Metal Film (varios valores)	5	0,3	1,5
CANADUINO resistores de alta potencia de 0,001 a 0,1 ohm, 2 wats	3	0,13	0,39
Schneider elec pbt pm 143 08 Transformador intensidad ti.c din 40/5 cable diámetro 21	3	25	75
Unbekannt PremiumX - Cable coaxial (1 m)	5	2,18	10,9
Precio promedio de perfiles metálicos	10	5	50
Placa de acero mecanizada	1	60	60
Tornillería	45	0,2	9
MKGT® -Varillas de soldadura para soldadura de acero suave E6013 ARC	25	0,26	6,5
SBS - Disco de corte inoxidable (1 unidad, 125 x 1 mm, flexible)	5	0,39	1,95
Desgaste de material (brocas y otras herramientas)	1	10	10
Gasolina (1 l)	1	130	130
<b>Materiales</b>			<b>4.745 €</b>

Horas de técnico electricista	504	35	17.640
Horas de taller	480	35	16.800
Horas de ingeniería	360	45	16.200
Consultas telefónicas a NIDEC	6	45	270
Visita de un técnico al taller	1	200	200
<b>Mano de Obra e Ingeniería (Prototipo)</b>			<b>51.110 €</b>

<b>Total (Prototipo)</b>			<b>55.855 €</b>
--------------------------	--	--	-----------------

La construcción del sistema (ACEE), ha sido financiado parcialmente por las empresas “Control Techniques” propiedad de Nidec Corporation (Japan), y por la cuenta de servicios UPC, del Dr. Ricard Bosch-Tous, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB/UPC), departamento de Ingeniería eléctrica (DEE).

## A.9 ANEXO 9 IMPACTO MEDIO AMBIENTAL

### A.9.1 Impacto medio ambiental

Este estudio ha sido realizado conjuntamente con nuestro colaborador, el Sr Antoni Durán Pascual, que participó activamente en la construcción del prototipo (ACEE) 7,4 kJ/25 A, para su TFG (Duran-Pascual, 2020).

Se analizan aquí, tanto el impacto medio ambiental, que se ha producido en la construcción del sistema (ACEE), como en su funcionamiento en una instalación real, en cuanto a reducción del consumo de combustible.

En el análisis del Impacto medio ambiental, por la construcción del sistema (ACEE) y ensayos, cabe destacar:

- Consumo de combustibles.
- Consumo de energía.
- Gestión de Residuos.

A.9.2 Consumo de combustibles

Se han consumido unos 130 lts de gasolina de 95 octanos, para alimentar a las máquinas térmicas de los grupos electrógenos, con los que se han realizado más de 150 horas de ensayos, con una media de CO<sub>2</sub> emitido de 2,3 kg por litro de gasolina, resultando 299 kg de CO<sub>2</sub> emitidos.



## Anexos

### A.9.3 Consumo de energía

Los conceptos a contabilizar son:

- Pruebas del sistema (ACEE), con un consumo en vacío de 3,4 kW, en aceleración de 9 kW y en descarga de hasta -5 kW, de regeneración a red negativos.
- Consumo de taller, incluye el de todas las máquinas herramienta utilizadas, soldadura, taladros, pulidora, etc.
- Iluminación y ventilación-extracción puesto de trabajo y sala de grupos electrógenos.
- Ordenadores, osciloscopio y elementos de medida.

La estimación de consumo de energía eléctrica, durante la construcción y realización de ensayos en el laboratorio ha sido de 660 kWh. Consultada la compañía eléctrica, el promedio de emisión de CO<sub>2</sub> es de 0,38 Kg por kWh consumido. El total emitido por consumo eléctrico. ha sido de 251 Kg de CO<sub>2</sub>.

A.9.4 Gestión de residuos

Los residuos consecuencia-- del consumo de materiales y energía, son:

- Embalajes de los equipos utilizados. Se incluyen los de los equipos electrónicos (VSD), el condensador y las inductancias, así como todo la aparamenta eléctrica, cables y plástico de las clavijas de conexión.
- Residuos varios de los materiales utilizados en la construcción del prototipo.
- Residuos de la generación eléctrica nuclear. Se incluyen aquí los residuos generados para producir la energía eléctrica consumida que, en el apartado de generación nuclear, se estima un residuo solido por kWh de 0,76 mg, lo que da un total de 502 mg de residuo radioactivo emitido.

## Anexos

### A.9.5 Emisiones de CO<sub>2</sub>

Globalmente, el cálculo estimado de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del consumo de combustible, la energía consumida durante la construcción del prototipo, ensayos y la gestión de residuos, resulta ser de 550 Kg

En resumen, las emisiones han sido de:

<b>Emisor de CO<sub>2</sub></b>	<b>Kg emitidos de CO<sub>2</sub></b>
Consumo de combustibles	299
Consumo de energía	251
Gestión de Residuos	despreciable
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> Total</b>	<b>550</b>

El impacto medio ambiental de la utilización del sistema (ACEE) tiene un saldo positivo, reduciendo las emisiones producidas, ya que se devuelve energía a la red, haciendo más eficaz el consumo total de energía eléctrica, debido a su gran rendimiento.

En los buques de propulsión eléctrica híbrida, es donde se encuentra una aplicación con gran impacto positivo medio ambiental del sistema (ACEE), que puede reducir el consumo de combustible, proporcionando los picos de potencia instantánea necesarios, mediante la descarga de la energía acumulada en el volante de inercia, sin aumentar la potencia media del grupo generador, y en algunos casos la reducción del tamaño del motor térmico que arrastra al alternador, ya que la problemática de arranque de cargas dinámicas, involucra esencialmente energía reactiva y puntas breves de potencia instantánea.