

GENERACIÓN ELÉCTRICA A BORDO: EFICIENCIA, CONTROL Y PROTECCIÓN.

“Tres criterios aparentemente antagonistas que deben respetarse en el diseño”

Antonio Herrero Sabat-Ingeniero Naval, Joan Medes García-Técnico en Instrumentación y Ensayos. Ricard Bosch i Tous-Dr. Ingeniero Industrial Departamento Ingeniería Eléctrica UPC, Fac. Náutica Bcn. y ETSEIB.

RESUMEN

Una planta eléctrica diseñada exclusivamente con criterios de eficiencia, no es capaz de suministrar adecuadamente la corriente que demanda el propulsor transversal de proa durante su arranque.

Es necesario un criterio de control de la excitación de estos alternadores, durante los episodios de arranque de propulsores eléctricos, que pueden durar algún segundo, suministrando corrientes superiores a la nominal. Debe mantenerse su tensión nominal en bornes en estos eventos.

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

El sobredimensionamiento de los alternadores, es la solución más simple para alimentar propulsores eléctricos 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 instalan.

Este trabajo, pretende ser una aportación tecnológica para resolver esta problemática de la propulsión Naval Diesel-Eléctrica, asegurando la alimentación de cargas dinámicas, con estabilidad y consumo de combustible óptimo.

ON-BOARD POWER GENERATION: EFFICIENCY, CONTROL AND PROTECTION.

“Three apparently antagonistic criteria that must be respected in the design”

**Antonio Herrero Sabat-Naval Engineer, Joan Medes García-Test Instrumentation Technician.
Ricard Bosch i Tous-Dr. of Industrial Engineering, Department of Electrical Engineering UPC,
ETSEIB and F.Nautic.Barcelona.**

ABSTRACT

A power plant designed exclusively with efficiency criteria is not capable of adequately supplying the current demanded by the transverse bow thruster during start-up.

A control criterion is needed for the excitation of these alternators, limited in size, during the start-up processes of electric thrusters; this can take a few seconds, supplying higher than nominal currents while maintaining its nominal voltage in terminals

The protection system must monitor the amount of time that the current exceeds the nominal value, disconnecting the loads if the time is excessive to ensure that the temperature of the unit does not reach dangerous levels.

The simplest solution for powering electric thrusters and their starters is to oversize the alternators. This keeps tensions and reactive energies at stable levels, with millisecond-scale monitoring. Some shipyards do not oversize them, focussing solely on criteria of efficiency and cost without considering the risks, thereby unwittingly endangering the stability of the power plants they are installing

This work aims to provide a technological solution to this problem, applicable to Naval Diesel-Electric propulsion, ensuring the feeding of dynamic loads, stability and optimal fuel consumption.

ÍNDICE

GENERACIÓN ELÉCTRICA A BORDO: EFICIENCIA, CONTROL Y PROTECCIÓN.	1
“Tres criterios aparentemente antagonistas que deben respetarse en el diseño”	1
ON-BOARD POWER GENERATION: EFFICIENCY, CONTROL AND PROTECTION.	2
“Three apparently antagonistic criteria that must be respected in the design”	2
1. INTRODUCCIÓN: “Los tres Criterios”	5
2. PROBLEMÁTICAS EN LAS PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.	6
2.1. Cargas Dinámicas.	6
2.2. Huecos de Tensión.	7
2.2.1. Profundidad, Duración y Recuperación. Generación de Reactiva Q.	7
2.3. Caídas de Planta.” Power Blackout”	9
3. POSIBLES SOLUCIONES DE ESTABILIDAD.	11
3.1. Tecnologías para aumentar y controlar la Potencia Transitoria.	11
3.1.1. Sobredimensionamiento del Alternador.	11
3.1.2. Volante de Inercia.	13
3.1.3. Elementos de control: (Frecuencia (f), Potencia Activa (P)) y (Tensión (U), Potencia Reactiva (Q))	15
3.2. Sistemas de almacenamiento energético para cargas cíclicas.	16
3.2.1. Servo prensas eléctricas alimentadas con redes de potencia “infinita” terrestres. ...	16
3.2.2. El ciclo de la ola con meteorología adversa.	17
4. CONTROLAR O PROTEGER. EL GRAN DILEMA DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICAS.	19
4.1. Interruptores Magnetotérmicos.	20
4.2. Validación Experimental.	21
5. CONCLUSIONES	23
6. REFERENCIAS	24

INDEX

ON-BOARD POWER GENERATION: EFFICIENCY, CONTROL AND PROTECTION.....	2
“Three apparently antagonistic criteria that must be respected in the design”	2
1. INTRODUCTION: “The three criteria”	5
2. PROBLEMS IN POWER PLANTS	6
2.1. Dynamic Loads	6
2.2. Voltage Dips	7
2.2.1.Extent, duration and Recovery. Generation of Reactive Power (Q)	7
2.3. Power Blackouts	9
3. POSSIBLE STABILITY SOLUTIONS	11
3.1. Technology to increase and control the Transient Power	11
3.1.1.Oversizing the alternator.....	11
3.1.2. Flywheels	14
3.1.3 Controls: (Frequency (f), Active Power (P), and Tension (U), Reactive Power (Q)) .	15
3.2. Energy storage systems for cyclical loads	16
3.2.1.Servo-electric presses powered by ‘inifinite’ terrestrial electrical networks.....	16
3.2.2.The wave cycle with adverse weather conditions	17
4. CONTROL OR PROTECT? THE GREAT DILEMMA OF ELECTRIC POWER PLANTS ..	19
4.1 Magnetothermic Switches	20
4.2. Experimental Validation	21
5. CONCLUSIONS	23
6. REFERENCES	24

1. INTRODUCCIÓN: “Los tres Criterios”.

Una embarcación portuaria con propulsor eléctrico, es capaz de frenar con una fuerza tres veces superior a la del propulsor Diesel de la misma potencia, en una maniobra de “Crash-Stop”.

Durante este episodio que puede durar hasta un minuto, el motor eléctrico, si es de imanes permanentes, pedirá a la planta eléctrica que lo alimenta, una corriente tres veces superior a la nominal ($3 \cdot I_N$), para poder transmitir a la hélice, un par tres veces mayor. Esta sobrecarga eléctrica es perfectamente admisible por toda la cadena energética, si dura poco tiempo.

Cuando el propulsor es un motor eléctrico de inducción, que son más baratos y robustos, para la misma respuesta mecánica, consumirá en el “Crash-Stop”, un poco más del doble de corriente ($7 \cdot I_N$), que el de imanes, porque trabajan con un factor de potencia ($\cos\phi$) más desfavorable. Esta energía reactiva suministrada por la planta de generación eléctrica, no supone un incremento de combustible del Diesel que arrastra el alternador, porque la compensa la corriente de excitación del alternador, que controla el campo magnético del motor propulsor, en forma de energía reactiva.

Estas prestaciones de frenado de la embarcación, superiores a las habituales con propulsión Diesel, son deseables, pero cuestan de ajustar en el diseño, pues deben respetarse tres criterios diferentes desde la construcción, para no romper el enlace eléctrico entre el alternador y el motor eléctrico del propulsor.

Criterio de Control

El alternador debe mantener su tensión en bornes, aunque la corriente supere sus valores nominales, para que el propulsor realice su función de frenado, evitando el accidente.

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 ($3 \cdot I_N$).

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 para mantener la sobre corriente, un tiempo limitado. El alternador debe sobredimensionarse, a menudo, para traducir a corriente estas energías transitorias.

Criterio de Protección

Las protecciones velan por la integridad de la instalación, desconectándola si las sobre corrientes duran más tiempo del admisible 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 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 un segundo, mientras disparan las protecciones.

No es caro a bordo, sobredimensionar para resistir esta sobrecarga.

Criterio de Eficiencia

Esconde un perverso razonamiento, a los que, desde la cultura mecánica, analizan superficialmente las potencias necesarias a bordo, que provoca la inestabilidad latente 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 mismo.

El motor Diesel, tiene un rendimiento mediocre pues solo se transforma en par y velocidad, el 30% del potencial energético del combustible.

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 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 los propulsores eléctricos, son muy eficientes, pero provocan además distorsión armónica (TDH), 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 se resuelven sobredimensionando el alternador respecto al Diesel que lo arrastra.[1]

2. PROBLEMÁTICAS EN LAS PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.

Analizaremos en este capítulo, los orígenes de la pérdida de estabilidad en las plantas de generación eléctrica, causadas principalmente por fenómenos externos a ellas.

2.1. Cargas Dinámicas.

Los motores eléctricos de inducción, son un ejemplo de carga dinámica, requieren de potencia Activa para acelerar sus masas hasta la velocidad de régimen, por eso durante su aceleración consumen más corriente, el generador debe suministrar estas corrientes sin que su tensión en bornes caiga. Esta energía cinética acumulada, puede convertirse reversiblemente en corriente eléctrica de forma transitoria, como ocurre en los acumuladores cinéticos de energía eléctrica.[2]

Los motores eléctricos de inducción demandan también, energía Reactiva para su magnetización, que sirve de enlace entre rotor y estator. Depende de la tensión en bornes del motor, y también se almacena 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), con factores de potencia de 0,4, lo que a menudo genera fuertes caídas de tensión transitorias, en cables y generadores. [3]

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.

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 una centésima de segundo, en caso de cortocircuito asimétrico. Es un valor muy poco útil para alimentar cargas dinámicas como los propulsores.[4]

Como vemos en el gráfico, 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, por la respuesta temporal del (AVR), estabilizándose en el entorno de los 500 ms.

La corriente de cortocircuito lleva asociada grandes caídas de tensión, debido a que las reactancias internas del alternador, consumen toda la fuerza electromotriz (E) disponible, dejando la tensión en bornes a cero.

Esta tensión cero en bornes del alternador, genera un gran riesgo de parada completa de planta, que se conoce con el nombre de “Blackout”.

Incluso en vacío, el motor eléctrico de inducción tiene una corriente de arranque muy inductiva, que disminuye a valores inferiores al nominal, cuando alcanza su velocidad de régimen, cercana a la de sincronismo (ω_s). La tensión tarda unos veinte periodos (300-400ms a 50 Hz) en recuperarse y se produce finalmente un rebasamiento en su valor, según el tipo de regulador de tensión del alternador. Es una carga ideal para el ensayo del alternador y su respuesta a cargas dinámicas.

2.2. Huecos de Tensión.

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

Analizamos a continuación su definición precisa y sus características.

2.2.1. 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. Suelen estar provocados por la conexión brusca de grandes cargas eléctricas y el retardo de actuación de los controles de tensión y frecuencia del alternador.

Por convenio, un hueco de tensión tiene una duración de entre 10 ms (medio ciclo a 50 Hz) y 1 minuto. Los huecos de tensión se pueden dar en una, dos o las tres fases.

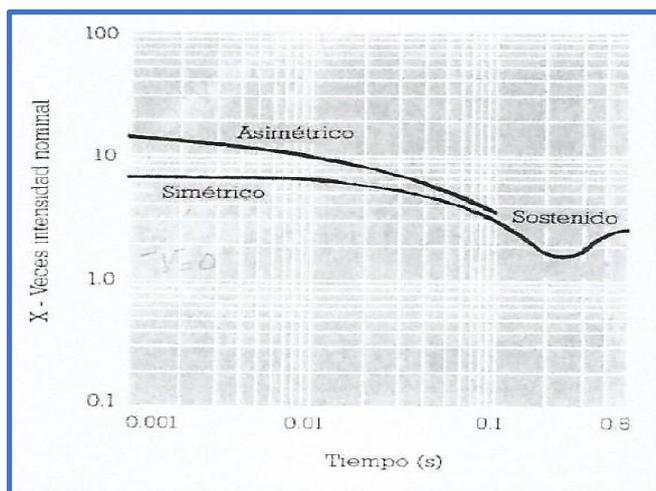


Fig. 1 Intensidad de excitación-tiempo, maquina síncrona en cortocircuito.

Las variaciones de tensión que produzcan caídas iguales o por encima del 90% de la tensión nominal, 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, suelen durar un tiempo mínimo de 100 ms.

El arranque de grandes motores eléctricos, la conexión brusca de carga o la conexión de grandes transformadores, suelen provocar huecos de tensión.

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

- Sobre intensidad, para intentar mantener el par resistente.
- Inestabilidad de funcionamiento por disminución del par motor disponible.
- Pérdida de velocidad mecánica, alejándose de la de sincronismo.

En el arranque de grandes motores de inducción, acelerar sus masas, solicita fuertes corrientes con bajos factores de potencia (0,4), que generan fuertes caídas de tensión internas del alternador, que hay que compensar con regulación de la corriente de excitación del alternador. El tiempo de reacción del control de tensión del alternador o su insuficiente potencia de cortocircuito, origina el hueco de tensión.

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 de inducción, produce huecos de tensión asimétricos en alguna fase, que dependen del instante de conexión de cada una de las fases y de la tecnología del interruptor de conexión de la carga.

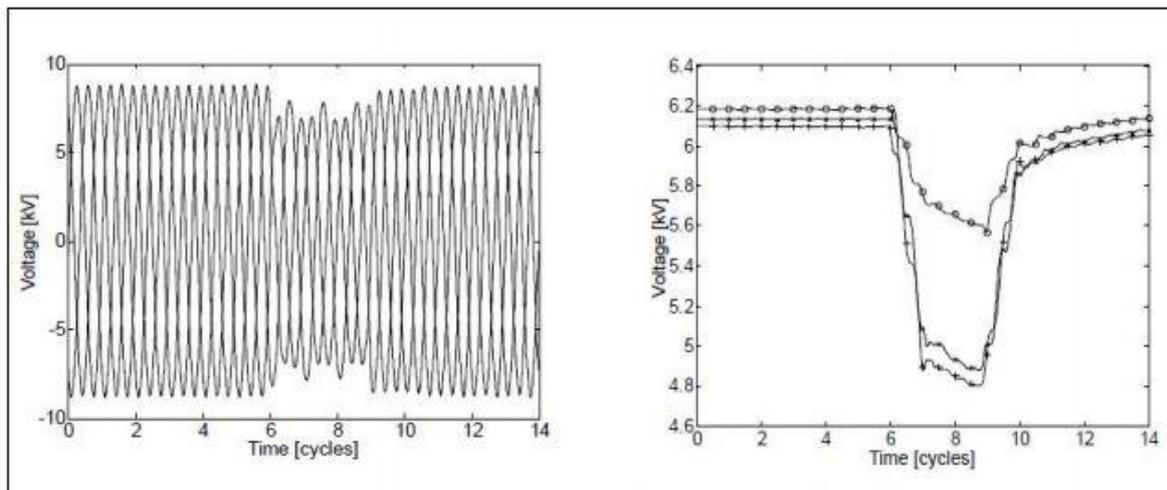


Fig. 2 Hueco de Tensión asimétrico, en dos de las fases, provocado por el arranque de un motor de inducción en vacío.

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

2.3. Caídas de Planta.” Power Blackout”.

La caída de planta de generación eléctrica “Power Blackout”, o “Blackout”, es una situación muy peligrosa y arriesgada para un buque, porque pueden tardarse minutos en volver a disponer de energía eléctrica. Esto afecta al gobierno y a la maniobra en buques tradicionales, pero aún más a buques especializados, donde la energía eléctrica es esencial para el mantenimiento en condiciones de seguridad de la Tripulación, del Buque y de la propia Carga. [5]

A bordo generalmente se usa corriente alterna trifásica, que está suministrada por grupos electrógenos (GE), compuestos de una Máquina Térmica Diesel, que arrastra a un Alternador Síncrono, con sus correspondientes controles de Frecuencia-Potencia Activa f-P, que gobiernan el flujo de combustible del motor Diesel y Tensión-Potencia Reactiva U-Q, que controlan la corriente de excitación de cada alternador.

Esta energía eléctrica, 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 eléctrica, 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.

Las cargas han dejado de ser lineales o de impedancia fija y es necesario tener en cuenta más criterios de control.[6]

Los grupos electrógenos, trabajan normalmente conectados en paralelo y dimensionados para la carga máxima, teniendo en cuenta los dos factores, el del porcentaje de consumo instalado 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.

En el entorno Naval, tradicionalmente el alternador se ha dimensionado erróneamente de igual potencia en kVA, que el motor térmico que lo arrastra en kW.

El alternador debe estar dimensionado, para el escenario de máximas corrientes simultáneas de arranque, de máquinas eléctricas de inducción. El hueco de tensión que provocan, ha de ser admisible para la estabilidad del grupo electrógeno y del resto de cargas.

Las tensiones 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 y en Cruceros cuyo consumo es aún mayor a los 10 MVA, se llega a los 11 kV.[7]

La planta de generación eléctrica de potencia, debe ser capaz de trabajar en las siguientes situaciones:

- Vacío: situación del alternador en funcionamiento, manteniendo su tensión nominal, sin carga externa. Deben vigilarse las sobretensiones, pues suelen aparecer en vacío.
- Nominal: el alternador tiene una carga externa correspondiente al 100% de la intensidad, para lo que fue diseñado, independientemente del factor de potencia. Todos los controles de (f-P) y (U-Q) deben estar activos y funcionando para mantener la Tensión y Frecuencia nominales, de forma constante a lo largo del tiempo.
- Sobrecarga: el alternador trabaja en régimen transitorio, con una corriente suministrada superior a la nominal, del orden del 200% durante 1 minuto, durante un tiempo limitado por su calentamiento interno en régimen adiabático. Con mal tiempo y propulsión eléctrica, es

admisible la sobrecarga de la instalación, en comportamiento cíclico, 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, con tensión en bornes nula, pues toda la F.E.M. se invierte en compensar las caídas de tensión internas del alternador. La corriente de cortocircuito es solo 3 veces la nominal, pues su impedancia interna es del 33%, en los mejores alternadores del mercado.

Las diferencias tecnológicas entre motores de inducción, generadores síncronos y sus corrientes de cortocircuito, nos enfrenta al dilema de cómo dimensionar un grupo electrógeno (GE) de forma óptima, especialmente si se deben alimentar grandes motores de inducción, con arranques severos.

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 y el par que se le aporta. Suele reaccionar a cambios de régimen en décimas de segundo.

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 importantes caídas de tensión en las reactancias internas del alternador. Suele reaccionar a cambios de régimen en décimas de milisegundo.

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, el causante de los “Blackouts”; este problema no se soluciona 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.

Asimismo, 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 las cargas y la generación.

La calidad del suministro debe satisfacer las cualidades fijadas por las Sociedades de Clasificación y la Administración Marítima:[8]

1. Continuidad del suministro, las caídas de plantas son inadmisibles en Plantas de Generación Eléctricas Marinas.
2. 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.
3. Calidad de la onda, que debe ser lo más senoidal posible.

Para verificar los criterios 2 y 3 es necesario realizar medidas eléctricas oscilográficas o similares, siendo insuficiente el análisis documental sin ellas.

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, cayendo en 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 habitual, dimensionar en relación de potencias, 1 kW de motor Diesel /1 kVA de Alternador.

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, se hace imprescindible el uso generalizado de osciloscopios y analizadores de redes eléctricas, así como la formación técnica del personal responsable.

Como ejemplo de ello, 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.

Los momentos más críticos del arranque de un motor de inducción, como el de la hélice transversal de proa, son los primeros 5 a 10 segundos, hasta que el propulsor llega a su velocidad de régimen, por eso puede medirse con el buque amarrado.

En propulsión Diesel Eléctrica, la proporción entre Potencia del Diesel (kW) y Potencia del alternador (kVA), deben 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.

3. POSIBLES SOLUCIONES DE ESTABILIDAD.

3.1. Tecnologías para aumentar y controlar la Potencia Transitoria.

La potencia transitoria generada a bordo, por lo general se realiza mediante alternadores síncronos de mercado con impedancias internas del 33%, lo que supone una corriente máxima suministrable por el alternador o corriente de cortocircuito (I_{cc}) de tres veces la nominal ($I_{cc}=3 \cdot I_N$). 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}) de veinte veces la nominal ($\approx 20 \cdot I_N$), que permite alimentar correctamente la mayoría de transitorios electromagnéticos, que provocan las cargas dinámicas alimentadas, que arrancan en tiempos de fracciones de segundo.[9]

A bordo puede resolverse esta problemática, con los sistemas que se citan a continuación:

3.1.1. Sobredimensionamiento del Alternador.

El arranque fuertemente inductivo puede superar la máxima corriente suministrable por el alternador o corriente de cortocircuito, generando severas caídas de tensión durante estos arranques.

Un alternador no puede arrancar correctamente un motor de inducción en vacío, aunque la potencia y 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, haciendo caer su

tensión, a la tercera parte y alargando el tiempo de arranque en el mejor de los casos a decenas de segundos, cosa que afecta negativamente al resto de cargas alimentadas por ese alternador.[10]

El alternador interpreta los arranques como episodios de sobrecarga o cortocircuito, que pueden desestabilizar la planta, por actuación temprana de sus protecciones o caída exagerada de las tensiones.

Si el arranque del motor eléctrico, consume corrientes del alternador cercanas a las máximas o de cortocircuito y dura más de 1 segundo previsto, agota la energía cinética acumulada en el volante de inercia del 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.

Si la instalación alimenta a grandes motores eléctricos, el consumo en el arranque de estos motores eléctricos de inducción (entre 7 y 8 veces su corriente nominal), puede superar la de cortocircuito del alternador, llevando la tensión en bornes a cero. Esto se evita sobredimensionando el alternador y sus protecciones, para aumentar su corriente máxima y que sea capaz de suministrar esa corriente de arranque al motor eléctrico, durante algún segundo de 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.

Como el problema es electromagnético, se puede evitar sobredimensionar el motor Diesel, sobredimensionando sólo el alternador síncrono y sus protecciones eléctricas, para poder alimentar esas corrientes y lograr con ello la estabilidad de la planta eléctrica frente a los arranques severos de grandes motores de inducción que alimenten. Esas sobre corrientes 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.

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. La potencia en kW del Diesel que lo arrastra, ha de ser igual que la potencia activa total neta requerida por la instalación, más las pérdidas del conjunto Diesel-Alternador. Sobre este mínimo debe añadirse la potencia transitoria necesaria, durante algún segundo, que toma la energía de las inercias rodantes. También ha de sumarse fasorialmente la potencia reactiva instantánea necesaria en la instalación, que no provoca 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. Añadir inercia al volante del Diesel, solo alarga el tiempo en que puede suministrarse corriente transitoria, no la magnitud de la corriente.

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, esta energía es imprescindible para la magnetización de los motores de inducción y 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 y que las fricciones o pérdidas de un alternador mayor, son del orden del 2% del incremento de potencia. [11]

Se ha verificado experimentalmente este sobredimensionado con gráficas de tensión y corriente, en el arranque en vacío de un mismo motor de inducción de 4 kW, contra distintos grupos electrógenos monocilíndricos:

- GE HONDA Gasolina 6,5 kW / 6,5 kVA (Comercial de referencia).
- GE HONDA Gasolina 5,5 kW / 8,5 kVA (Alternador Sobredimensionado, respecto al motor térmico que lo arrastra)

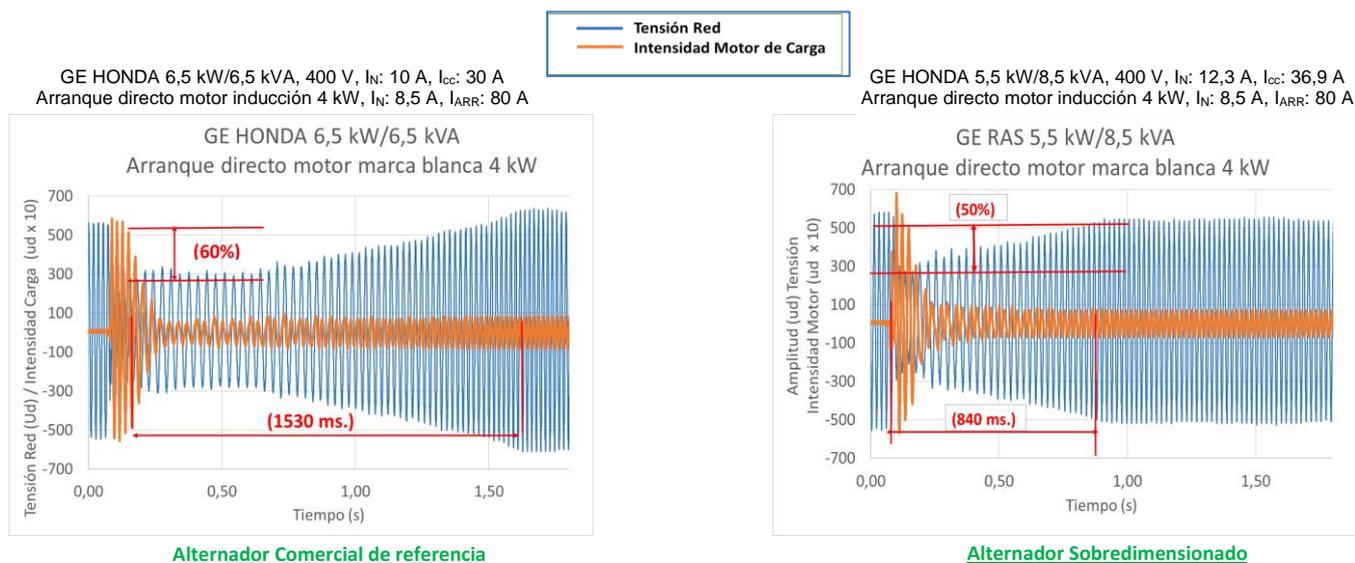


Fig. 3 Arranque directo de un motor de inducción de 4 kW, 400V, I_N 8,5 A, I_{ARR} 80 A, con Grupo Electrónico HONDA comercial 6,5 kW/6,5 kVA y con Grupo Electrónico especial HONDA Gasolina 5,5 kW/8,5 kVA (Conjunto con una talla comercial menos de máquina térmica y una más de Alternador, respecto al anterior grupo comercial de referencia)

Obsérvese, gráfica de la izquierda, como un alternador de corriente nominal de 10 A, ve profundamente afectada su 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. El alternador no es capaz de suministrar la corriente de arranque en vacío, del motor de 80 A, pues su corriente máxima no supera los 30 A. Este conflicto hace caer la tensión a la mitad durante más de un segundo, alargando el tiempo de arranque del motor y provocando una situación crítica por la caída de tensión, que afecta el resto de cargas alimentadas por ese grupo o planta eléctrica. Pueden aparecer disfunciones en las protecciones o cargas electrónicamente reguladas.

Sobredimensionando el alternador sólo una talla comercial por encima de la que le correspondería comercialmente, gráfica de la derecha, mejora netamente los parámetros de 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%). Bajar una talla la máquina térmica, demuestra que no es un problema mecánico sino electromagnético.

3.1.2. Volante de Inercia.

Los volantes de inercia han sido utilizados durante siglos en numerosas aplicaciones, cumpliendo la función de:

- Almacenar energía de rotación, a fin de poderla utilizar en cualquier momento.
- Amortiguar impactos torsionales de carga o tracción.

Es un sistema muy utilizado en la industria y otros ámbitos. Un ejemplo mediáticamente relevante, se produjo al limitar la potencia en el año 2011 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.[12]

Los volantes de inercia, se incorporan actualmente en muchas de las arquitecturas de máquinas, en las que deseemos obtener regularidad y estabilidad en la velocidad de rotación.

Los volantes de inercia asociados al eje de un grupo electrógeno, aportan energía activa pura, por la conversión de la energía cinética acumulada en energía eléctrica, durante el proceso de arranque del grupo. Solo alargan el tiempo que el alternador puede suministrar la corriente de sobrecarga o cortocircuito, no el valor de esta que depende de la potencia del alternador.

Los sistemas regenerativos electrónicos como elemento de estabilidad de las plantas eléctricas, asociados a un motor auxiliar de alta inercia, aportan además energía reactiva, siendo ajustable electrónicamente mediante parámetros residentes en el accionamiento electrónico regenerativo.

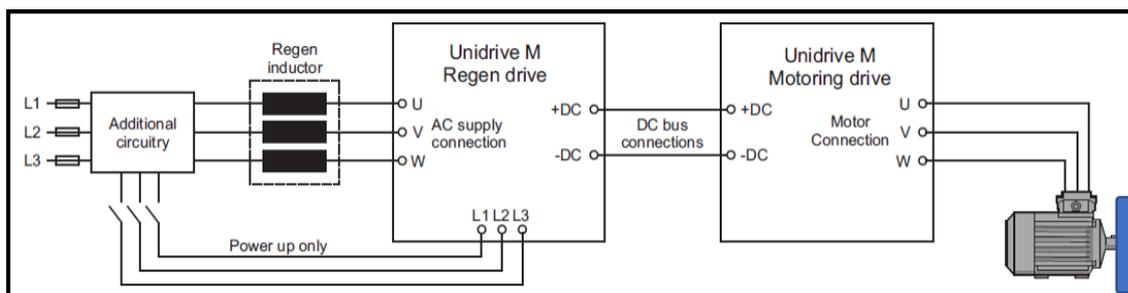


Fig. 4 Sistema Regenerativo Electrónico con motor de inducción de alta inercia y volante. Fabricante "Control Techniques", grupo Nidec.

Los volantes de inercia tienen la ventaja, de poder suministrar una gran cantidad de energía en un tiempo relativamente corto, entre 1 y 60 s. 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.

3.1.2.1 Conclusión sobre los ACEE (E-KERS).

Un alternador síncrono puede actuar como volante de inercia, que traduce directamente sus parámetros mecánicos (ω , Γ) a parámetros eléctricos (U , I , f). 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 tensión y frecuencia 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.

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, sin llegar a su corriente de cortocircuito, con sus protecciones electromagnéticas ajustadas a esa máxima corriente.

La máxima corriente de la carga, no debería superar ($2,5 \cdot I_N$) 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 y la potencia instantánea, requieren 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 considerada cara por parte de algunos astilleros, que no tienen en cuenta el riesgo que asumen sacrificando, sin saberlo, la estabilidad de las plantas que instalan.

Como resumen, la instalación en paralelo al grupo de generación, de acumuladores cinéticos ACEE (E-KERS) adecuadamente controlados, tiene por objetivo minimizar el impacto de las grandes cargas, singulares o cíclicas (especialmente procedentes de arranques de motores de inducción), descargando la energía acumulada justo en el transitorio de arranque, que son los que pueden provocar caídas de planta eléctrica.[13]

3.1.3. Elementos de control: (Frecuencia (f), Potencia Activa (P)) y (Tensión (U), Potencia Reactiva (Q))

El control (f-P) velocidad (frecuencia), potencia activa, y par de la máquina, está relacionado con el caudal de combustible que llega al motor Diesel.

El control de tensión reactiva (U-Q) regula la intensidad de excitación del alternador por parte del sistema automático “AVR”. Los tiempos de reacción de ambos controles son diferentes, (f-P) responde a las variaciones de carga en décimas de segundo y (U-Q) en milésimas de segundo

Los expertos en ingeniería mecánica, no suelen prestar la atención necesaria a este aspecto esencial para la estabilidad de las plantas de generación eléctrica.

Aunque el control de la frecuencia y potencia activa está relacionado con el control de la tensión y la reactiva, los consideraremos por separado, para una mejor comprensión de los sistemas de regulación. El regulador de velocidad la mantiene en márgenes estrechos, que varían lentamente en el tiempo, por la capacidad de almacenamiento de energía cinética de rotación de las masas rodantes de generación.

A modo de resumen:

Tabla 1 Control de f,P,U y Q en una maquina sincrona trabajando en isla o con red infinita.

Parámetro de Control	Alternador aislado	Alternador en Red
Combustible Diesel	Frecuencia f	Potencia Activa P (W)
Corriente de excitación Alternador	Tensión U	Potencia Reactiva Q (VAr)

El sistema AVR, regula la intensidad de excitación del alternador para tratar de mantener la tensión en bornes (U) lo más constante posible, frente a las variaciones de la carga.[14]

3.2. Sistemas de almacenamiento energético para cargas cíclicas.

Las cargas cíclicas, suponen un reto para la estabilidad de las plantas eléctricas de generación de energía eléctrica, tanto por la velocidad de reacción del sistema frente a variaciones de carga, tensión, como de frecuencia y a sus controles respectivos. En el caso de un conjunto Diesel alternador aislado, la tensión de salida del alternador está gobernada por la intensidad de excitación del alternador y la frecuencia de salida del alternador está gobernada por el regulador de flujo de combustible de la maquina Diesel que lo arrastra

Compensando estas cargas cíclicas, conseguiremos una mayor estabilidad del grupo de generación y menores costes de central de transformación, 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.

3.2.1. Servo prensas eléctricas alimentadas con redes de potencia “infinita” terrestres.

Ejemplo de aplicación industrial, instalable a bordo. Se trata de prensas 100% eléctricas que incorporan un sistema de gestión y de acumulación de energía cinética, para el alisamiento y reducción de los picos de corriente demandada. Se basa en acumuladores cinéticos de energía eléctrica ACEE (E-KERS), asociados a una máquina eléctrica rotativa de alta inercia, que realiza la transformación electromecánica, consiguiendo, además, una reducción del peso, coste y dimensión, de los elementos eléctricos, tales como: estación transformadora, cables, protecciones, etc. y una reducción del stress mecánico del conjunto. [15]

Estas servo prensas (masa de 100 Tm) con consumos eléctricos entre 3 y 10 MW, con el uso de esta tecnología reducen el término de potencia de pico de la estación transformadora, entre un 50% y un 70% aproximadamente.

El sistema de alimentación eléctrica del accionamiento de la prensa, se complementa con dos sistemas de acumulación de energía, uno el principal, de acumulación de energía cinética ACEE (E-KERS) basado en motores de inducción de alta inercia (potencia de 1MW / Ud) y otro acumulador, este de refuerzo, de tipo estático (grupos de condensadores, potencia unitaria de 250 kVAR).

Estos sistemas acumuladores de energía, se utilizan para proveer de la energía necesaria, a fin de acelerar los motores principales de la prensa (Motores “Par”). Estos motores, en el futuro, deberían emplearse para accionar los propulsores navales, directamente acoplados a las hélices, de los buques que deban operar con cargas cíclicas de mal tiempo meteorológico.

Estos sistemas acumuladores, permiten reducir el pico máximo de energía eléctrica consumida de 3 MW, a 650 kW rms, siendo además siempre positiva, con los efectos beneficiosos de costes y reducción de fatiga electromecánica de los elementos afectados.

A continuación, se muestran las gráficas de la energía consumida por la prensa, potencia vs tiempo, sin y con el sistema de acumuladores cinéticos de energía eléctrica y su software de gestión asociado.

Se observa en las gráficas de abajo, el gran cambio que se produce con el sistema completo de regeneración (curva de color azul), que como podemos ver está alisada y siempre en la zona de consumos positivos (+650 kW).

Los ahorros financieros en este caso, son del 41,6% y reducen drásticamente el “Pay Back”.

La energía generada cuando los motores “Par” principales (750 rpm) frenan, se utiliza para cargar estos sistemas acumuladores cinéticos. Por esta razón, el centro de transformación puede dimensionarse para tan solo cubrir la energía rms media, consumida por la prensa.

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 (similar de la subida y bajada de la ola).

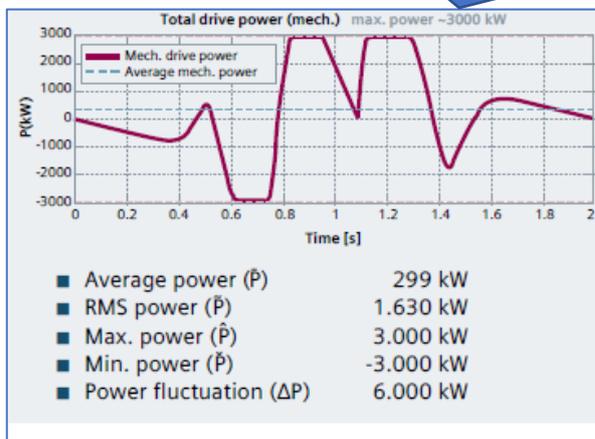


Fig. 6 Perfil de Energía consumida sin Regeneración en un ciclo.

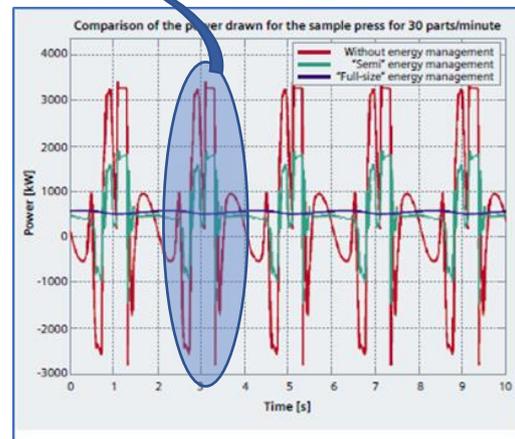


Fig. 5 Perfil de energía consumida sin y con Regeneración en cinco ciclos.

Utilizando lo mejor de este mundo, considerado de alto nivel tecnológico, se ayuda a la transición del entorno naval, hacia un concepto híbrido y eléctrico de los buques y por tanto ayudar a **optimizar el dimensionado y estabilidad de las Plantas Marinas de Generación Eléctrica**.

3.2.2. El ciclo de la ola con meteorología adversa.

En un buque de propulsión Diesel-Eléctrica y ante cargas cíclicas como las de propulsión con olas, el Diesel ya no ha de arrastrar el propulsor durante los episodios de máximo par resistente, máxima ola remontada, sino que solo aporta la energía media del ciclo de ola, que supone un consumo mucho menor. 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.

En los gráficos de abajo, expresados con ordenadas en tanto por uno, tenemos las curvas de par e intensidad respecto a la velocidad de rotación de un motor de inducción, con **alimentación de potencia infinita** (trazo continuo) y **de grupo electrógeno** (trazo discontinuo), accionando una carga tipo hélice en **régimen de navegación uniforme y estable**.

La diferencia positiva de la curva de par motor (curva verde) frente a la de carga (curva roja), se corresponde con el par de aceleración de la carga, lo que sucede hasta que ambas curvas se cruzan en el punto **(A)**, denominado punto de equilibrio par motor-par resistente, que es aconsejable que no supere el punto nominal de trabajo, estabilizándose su corriente y velocidad de giro. Este punto, debe coincidir con el de par y corriente nominal del motor y se corresponde en este caso con una velocidad de 1460 rpm, un deslizamiento $s=2,6\%$

En cuanto a la corriente del motor (curva azul), alcanza un máximo de 7 veces la nominal a velocidad cero, estabilizando su valor en el punto de intensidad nominal **(A)**. Si la velocidad supera la del punto

(A), el par resistente supera al del motor, con lo que tenemos un frenado del rotor, que vuelve al punto (A), de forma estable.[16]

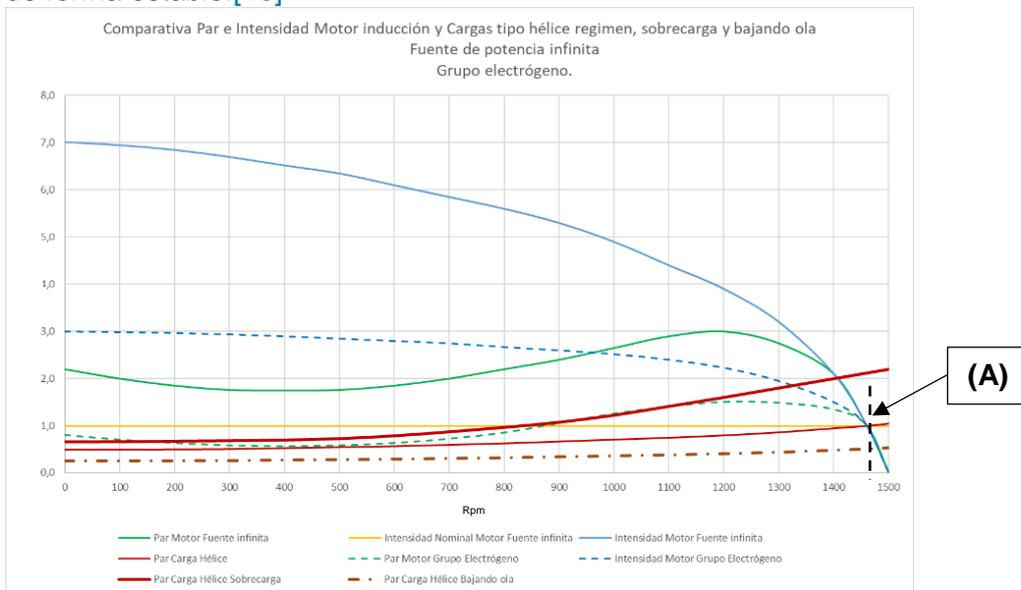


Fig. 7 Par e Intensidad Motor Eléctrico de inducción con la curva de Carga de Hélice en régimen estable, alimentación por fuente de potencia infinita.

Con **fuente infinita**, si la carga aumenta por **condiciones adversas al paso de una ola**, la curva de carga (roja) pasa a ser la de trazo continuo más grueso.

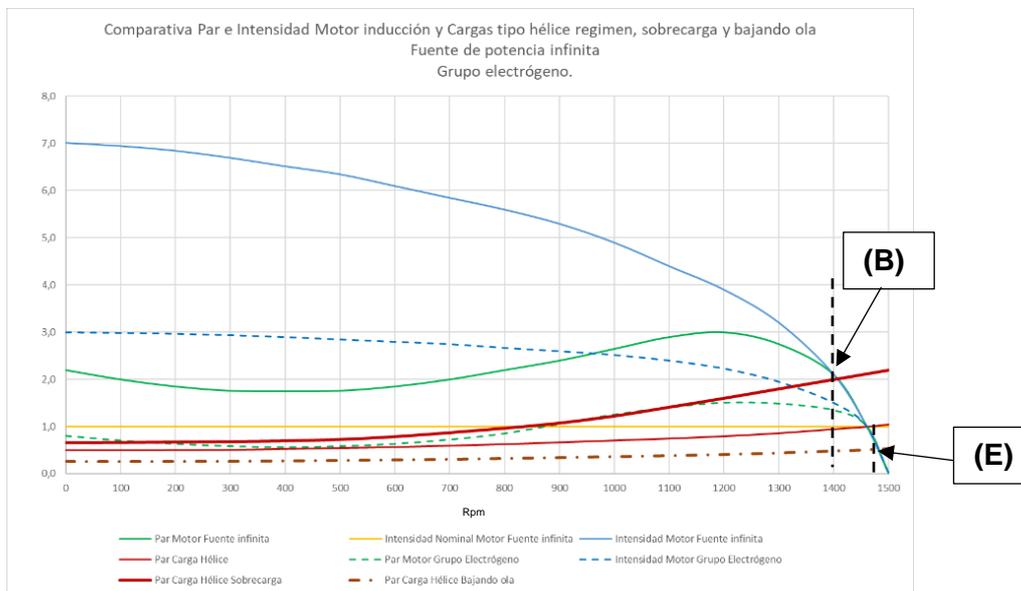


Fig. 8 Par e Intensidad Motor Eléctrico de inducción con la curva de Carga de Hélice en régimen de sobrecarga y bajando ola, alimentación por grupo electrógeno.

En este caso las curvas de par motor y par carga, se cruzan en el entorno de 1400 rpm, punto (B) 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.

El efecto joule calienta el motor en función de $P=I^2 \cdot R$, que en términos de energía resulta una función $E=I^2 \cdot \text{tiempo}$.

El calentamiento $I^2 \cdot t$ del motor, puede compensarse en un comportamiento cíclico con la relajación de corrientes y pares resistentes al bajar la ola punto **(E)**, este funcionamiento del propulsor, resulta admisible y puede generar un importante ahorro de combustible en el motor Diesel (curva roja gruesa a trazos), pero resulta imprescindible que la tensión no caiga de forma inadmisibile.

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 que los motores eléctricos arrancan rápidamente.

Este sobredimensionamiento no es tan caro como parece, pues el motor Diesel es el dispositivo económicamente más elevado del conjunto Diesel-Generador.

4.CONTROLAR O PROTEGER. EL GRAN DILEMA DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICAS.

La sobrecarga eléctrica de algunos segundos alimentando propulsores eléctricos, suele interesar en el mar puntualmente, para ciclos de sobrecarga-relajación o maniobras límite de atraque, anticolisión, etc.

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, sin disparar protecciones durante algún minuto o de cortocircuitos durante un segundo.

Los alternadores deben protegerse frente a sobrecargas y cortocircuitos que puedan producirse en la red que alimentan. La protección magnetotérmica no es suficiente, ya que como se ha indicado el alternador síncrono comercial, no dará más de 3 veces su corriente nominal y los magnetotérmicos comerciales, están previstos para redes de potencia infinita, con intensidades muy grandes durante tiempos más breves. El calentamiento de la instalación obedece a la ley corriente al cuadrado por tiempo ($I^2 \cdot t$). 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, porque a esas corrientes, el calentamiento de los cables es mucho más lento.

Por esta razón el sistema de protección de un alternador frente a cortocircuitos de larga duración, debe incluir un relé térmico ($I^2 \cdot t$) y además un relé de disparo diferido con retardo de unos 10 s. después del cortocircuito de 3 veces la I_N , porque el relé magnético no llegara a excitarse para disparar.

Todas las instalaciones terrestres deben soportar un cortocircuito, durante un tiempo máximo de 1 segundo, que es la corriente que demandan los motores eléctricos durante la aceleración de su rotor.

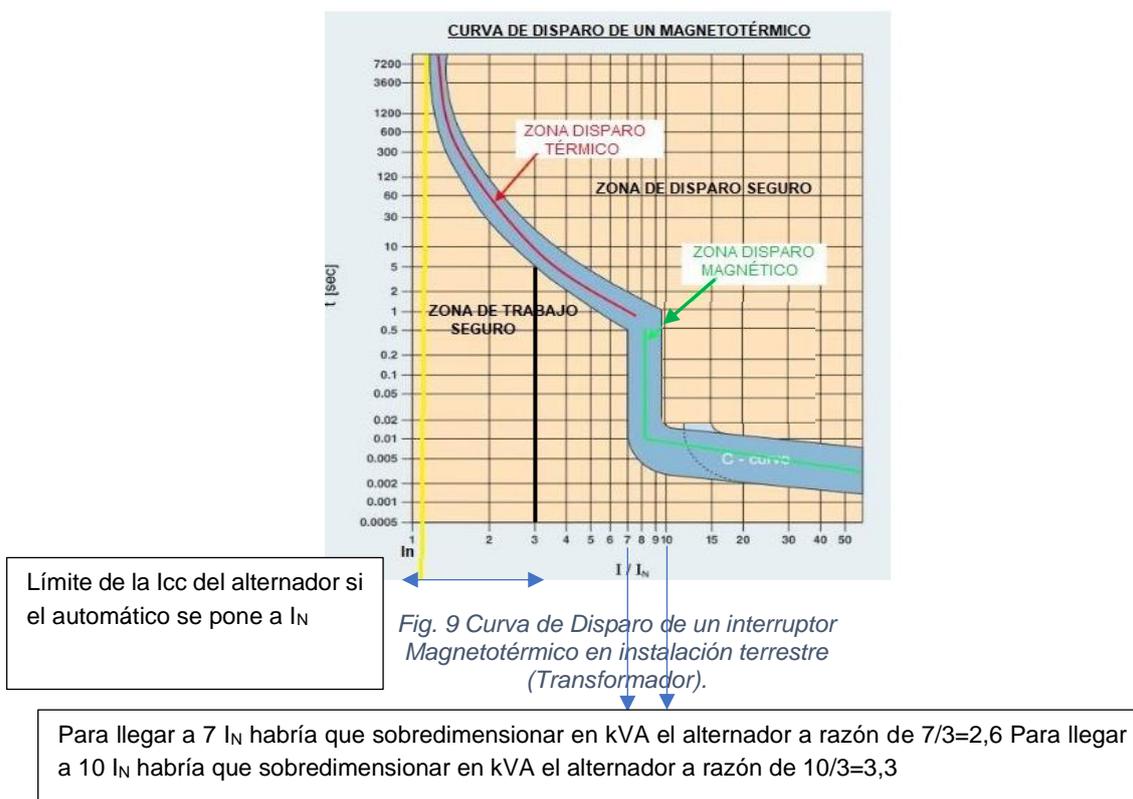
En las instalaciones terrestres, mediante las protecciones magnetotérmicas adecuadas, se permiten corrientes de sobrecarga, incluso ocasionalmente cercanas a las de cortocircuito, sin dispararlas en milisegundos. Es lo que demandan las reactancias para magnetizar su núcleo magnético asociado, lo cual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

Por tradición y márgenes de seguridad excesivas en el campo naval, estamos desperdiciando una zona de trabajo que es “segura” (ver gráfico de abajo) y que nos 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 parte magnética de la protección, se ha de asegurar que el alternador sea capaz de suministrar esa corriente y para ello se sobredimensionará (de 2,6 a 3,3 veces), respecto a la potencia del Diesel que lo arrastra, acercando su corriente máxima a la símil terrestre (ver gráfico). Este criterio todavía no está generalmente asumido por astilleros y armadores, que lo consideran caro, sin ser conscientes del riesgo que asumen por la inestabilidad de las plantas de generación a bordo.

4.1 Interruptores Magnetotérmicos.

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 a intensidad nominal, se observa:



La corriente nominal (I_N), define la potencia activa que el alternador suministra a las cargas resistivas a través de la corriente que consumen. El Motor Térmico, debe aportar el par nominal al alternador más las pérdidas de éste.

La corriente en vacío (I_0) del motor de inducción, es la que absorbe sin tener ningún par en el eje, girando cerca de la velocidad de sincronismo, es fuertemente inductiva con factores de potencia del orden de 0,4. En el ejemplo experimental propuesto, esta corriente del 65% I_N , resulta perfectamente asumible por el Motor Térmico y por el alternador, porque está por debajo de la corriente nominal y porque la reactiva no provoca par resistente en el eje del alternador

La línea amarilla, $I/I_N > 1$, marca la zona a partir de la cual el interruptor puede disparar. Como se ve en el gráfico en estas condiciones debería estar más de 7200 s. (2h) a esa corriente para que se abriera, pues esa ligera sobrecarga no genera calentamientos inasumibles en los cables, porque las inercias térmicas obedecen a la fórmula I^2t como que penaliza cuadráticamente el consumo de corriente, permite alargar el tiempo de sobrecarga admisible.

Se observa igualmente en la Fig. 8, 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 curva de arriba, que representa el tiempo máximo que puede tardar en abrirse en las mismas condiciones.

Para una intensidad fijada, la incertidumbre sobre el intervalo de tiempo que tardará en abrirse será el que hay entre 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 primera curva. En esta zona el interruptor magnetotérmico trabaja de forma segura y estable sin abrirse y protegiendo al circuito en caso de sobrecarga o cortocircuito.
- Zona de Incertidumbre (Color azul): Zona donde el interruptor magnetotérmico deberá abrirse. 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 interruptor magnetotérmico llega a esta situación, ya debe estar abierto para proteger el circuito, el límite lo define la segunda curva.

En la zona de incertidumbre, existen dos franjas de disparo, una por bimetal (térmico), lento y preciso (I^2t) y otra para mayores intensidades donde empezará el disparo por electroimán (magnético), rápido con las limitaciones del mecanismo.

4.2. Validación Experimental.

Han sido realizados ensayos de lectura de corriente vs tiempo, de arranques en vacío del mismo motor de inducción de 4 kW, en los laboratorios de Alta Tensión de la ETSEIB, UPC, Barcelona, a fin de determinar zonas de trabajo seguras que tradicionalmente son olvidadas. De los diversos registros oscilográficos realizados destacamos en la gráfica siguiente, con la misma escala y mismos ejes, estos transitorios, con diferentes fuentes y grupos electrógenos:

1. Intensidad motor Fuente Infinita. (negro)
2. Intensidad motor Grupo Comercial 6,5 kW/6,5 kVA Honda. (Rojo)
3. Intensidad motor Grupo con alternador sobredimensionado y motor térmico menos potente, 5,5 kW/8,5 kVA (Azul)
4. Intensidad motor Grupo Honda y control ACEE-(E-KERS) con anticipación 80 ms. (Verde)



Fig. 10 Sistema Electrónico Regenerativo con volante de inercia y osciloscopio de registro, en los laboratorios de alta tensión de la ETSEIB, UPC, Barcelona.

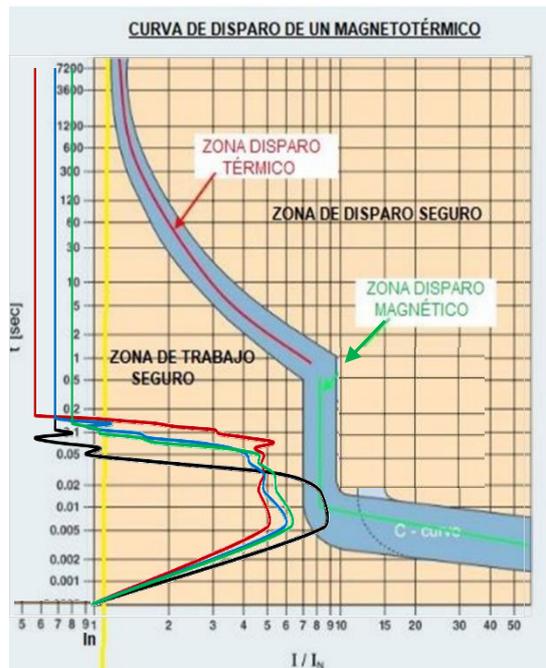


Fig. 11 Registros de Intensidad de diferentes arranques del motor Novat, sobre la curva de disparo de un Magnetotérmico.

Se muestran las corrientes de estos transitorios de arranque, máximas asimétricas, llegando hasta las 6,5 veces en el caso del ACEE (E-KERS), que aporta una extra corriente al alternador.

Tabla 2 Duración e intensidad del transitorio de arranque del motor 4 kW con diversas fuentes de energía.

Fuente de Energía/Grupo Electrónico	Código de color	Duración Transitorio de Arranque	Corriente máxima Arranque asimétrico I/I_N
Infinita	Negro	50 ms	9
Honda comercial 6,5 kVA	Rojo	150 ms	5
Honda modificado 8,5 kVA	Azul	120 ms	6
Honda comercial + ACEE (E-KERS)	Verde	100 ms	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, si no están bien ajustadas.

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 la protección, que, en nuestra experimentación, se ha dimensionado para trabajar con el alternador.

La intensidad de arranque es variable en cada transitorio, debido a posibles asimetrías entre fases, que suelen quedar muy desequilibradas, según el instante de conexión de cada uno de los tres contactos, respecto de la senoide de tensión.

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 (E-KERS) se reduce la duración del transitorio de arranque, con la entrada del sistema del acumulador cinético de energía eléctrica, que añade más corriente a la suministrada por el alternador, obteniéndose los mejores resultados.

5.CONCLUSIONES

Formulamos 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. 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.
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, ni calentamientos peligrosos.
3. Incorporar un acumulador cinético de energía eléctrica, ACEE-(E-KERS), 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, 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.[17]
4. Complementar los acumuladores eléctricos de energía cinética ACEE-(E-KERS), con grupos de condensadores adecuadamente controlados para aumentar la potencia instantánea y la velocidad de reacción de la descarga de energía del sistema, a fin de compensar las caídas de tensión impuestas por el arranque de grandes motores de inducción.[18]

6. REFERENCIAS

- [1] Ricard Bosch-Tous, “Control Protecció de Sistemes Elèctrics, Recull d’apunts.” CPDA-ETSEIB-UPC, Barcelona, 2018.
- [2] O. I. Elgerd, “Control of Electric Power Systems,” *IEEE Control Systems Magazine*. University, Florida, Estados Unidos, 1981.
- [3] Ricard Bosch-Tous, “Dynamic loads in Gensets May 1990 N °2,” *Automatica e Instrumentacion Barcelona*. Barcelona, 1990.
- [4] M. Cortes-Cherta, “Curso Moderno de Maquinas electricas rotativas,” 1974th ed., E. Asociados, Ed. Barcelona: Gersa, Barcelona, 1974, p. 272.
- [5] O. P. Veloza and F. Santamaria, “Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: Classification of incidents and review of main causes,” in *Electricity Journal*, 2016, vol. 29, no. 7.
- [6] J. A. Martinez-Velasco, “Transient Analysis of Power Systems,” in *IEEE Press*, John Wiley., J. A. Martinez Velasco, Ed. Barcelona UPC: IEEE Press, 2015.
- [7] IEC, “IEC 60038 -2009: IEC standard voltages,” *Policy*, 2009.
- [8] Lloyd’s Register, *Rules and Regulations for the Classification of Ships*. London, UK, 2014.
- [9] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients - Parameter Determination*, CRC Press. Boca Ratón, Florida, 2010.
- [10] A. Pernía, “Conceptos Básicos de Máquinas Síncronas,” https://www.researchgate.net/publication/235752001_Maquinas_Sincronicas_Conceptos_basicos. Universidad Nacional Experimental del Táchira, UNET San Cristóbal, Tachira, Venezuela, 2014.
- [11] L. Vargas, “Regulador de tension en generadores síncronos para control volt/VAR en sistemas de distribución.,” *Univ. Costa Rica*, 2013.
- [12] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Flywheel energy and power storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Seabased Industry AB, Uppsala, Sweden, 2007.
- [13] Ramon Garrigosa García, “Anàlisi experimental de la problemàtica de càrrega-descàrrega de ACEE aplicables en transports,” Tesis Doctoral, UPC Barcelona, 2017.
- [14] Ricard Bosch-Tous, “Informe especial, Grupos electrógenos de emergencia. Barcelona,” *Automatica e Instrumentacion*, Barcelona, 1990.
- [15] D. Siemens- AG, “Energy management for Servo Presses,” Erlangen GERMANY, 2014.
- [16] M. Cortés-Cherta, J. Corrales-Martín, and A. Ensenyat-García, *Teoría General de Máquinas Eléctricas*. UNED, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, 1991.
- [17] A. Herrero-Sabat, “Aportaciones a la Estabilidad de Plantas Marinas de Generación Eléctrica, con Volantes de Inercia,” Facultad de Nautica de Barcelona UPC, Tesis Doctoral pendiente de lectura, 2022.
- [18] A. Herrero-Sabat, J. Alvarez-Florez, P. Casals-Torrents, R. Bosch-Tous, and A. Serrano-Fontova, “Contributions for improving the stability of marine power generation plants,” *Eng. Fail. Anal. Ed. Elsevier.*, p. 21, 2020.