

Título:

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE MÁQUINAS
ELÉCTRICAS Y PROPULSIÓN PARA UNIDADES MEKO 140
(MAQUELPRO)**

Autor/es:

- Escuela de Oficiales de la Armada (ESOA) – Cuerpo Docente de las Áreas Máquinas y Electricidad
 - Esp. Jorge Monticelli
 - Ing. Juan Valea
 - Ing. Pablo Verniere
 - Ing. Adrián Gonnet
 - Ing. Juan Oga
- Servicio de Análisis Operativo, Armas y Guerra Electrónica (SIAG) – Departamento de Adiestradores y Simuladores.
 - ASI Guillermo O. Escudero
 - ASI Rubén J. Roth

Tema:

Desarrollo de un simulador del tablero de comandos de un Cuarto Control de Máquinas y Electricidad de una unidad del tipo MEKO 140 a los fines de ser aplicado como herramienta didáctico – pedagógica en los trayectos educativos de las carreras de Especialización en Sistemas Eléctricos Navales y Sistemas Mecánicos Navales de la Sede Educativa ESOA

Fecha: 2018

Palabras claves:

Simulación – Programación – Propulsión - Generación

Resumen:

El proyecto de investigación se basa en el desarrollo de un simulador de máquinas endotérmicas eléctricas y de propulsión que permite la representación y operación virtual

de sistemas navales que utilizan ese tipo de máquinas. Logra simular la operación y funcionamiento del conjunto sistema de generación generador – y de propulsión de las unidades tipo MEKO 140 de la Armada.

De esta manera, contribuye a la formación del personal de oficiales de la Armada sobre la base de la práctica activa, a la vez de reducir el costo operativo y el desgaste de los equipos instalados en las unidades de superficie al evitar efectuarlo a bordo.

Abstract:

The research project involved the development of a simulator of electrical and endothermic propelled machines that allows the virtual representation and operation of naval systems that use this type of engine, to contribute to the training of naval officer personnel, based on active practice and with the intention to reduce the operational cost and burnout of the equipment installed on the Navy units.

This software simulates functioning and allows interactive operation of the generator - propulsion set installed on MEKO 140 ships.

Documento:

1. Objetivo del proyecto

Consiste en el desarrollo de un adiestrador de máquinas endotérmicas eléctricas y de propulsión que permita la representación y operación virtual de sistemas navales que utilicen ese tipo de motores y sistemas de generación cuya máquina primaria sea motor diésel. De esta manera contribuye a la formación del personal de oficiales de marina de distinto rango, aumentando la cantidad de horas prácticas y reduciendo el costo operativo y el desgaste de los equipos instalados en las unidades de la Armada.

2. Formulación del adiestrador

Este sistema se define como una herramienta didáctica para la formación y capacitación de oficiales de la especialidad Máquinas y Electricidad que estén destinados a bordo de las unidades tipo MEKO 140 u otras con configuraciones similares.

Consta de cuatro partes principales:

- Módulo del Instructor (Propulsión)
- Modulo del Instructor (Electricidad)
- Módulo de Propulsión (Máquinas)
- Módulo de Generación (Electricidad)

Un requerimiento de diseño, surgido del análisis previo, establece que no es necesaria la interacción de los módulos de Propulsión y Generación durante un ejercicio de adiestramiento, sino que cada uno contará con su propio módulo para el instructor y serán, por lo tanto, independientes en cuanto a funcionamiento. En la primera etapa se convino encarar el desarrollo de la parte Propulsión y dejar para una segunda el correspondiente a Generación, con su instructor propio.

El software necesario para implementar los módulos de esta etapa se distribuye en dos estaciones de trabajo (instructor y alumno o comisión de alumnos) sobre una red de computadoras personales. Esto no constituye una limitación ya que la instalación podrá ser ampliada agregando un conjunto de computadora(s) + monitor(es) por estación (como se prevé para la etapa de Generación debido a la cantidad de paneles de instrumental que deben verse al mismo tiempo). Si bien esto es factible, supone una

recarga en las funciones de supervisión normalmente asignadas al instructor ya que no está previsto que exista más que una estación para este propósito.

3. Prestaciones requeridas

En el módulo de Propulsión se representa la interacción entre un elemento motriz (motor diésel) y una carga acoplada (hélice de propulsión sumergida), considerando las variaciones impuestas por la carga ambiente y las respuestas del elemento motriz en función de las condiciones de operación, normales y de emergencia.

Para las MEKO 140, esto comprende simular la puesta en marcha de los motores propulsores, el funcionamiento de una o dos líneas de ejes, la resistencia que las palas de la hélice ejercen en el conjunto motriz, la representación de los comandos, sensores y alarmas que intervienen y la posibilidad de interactuar en tiempo real con ayuda de una interface de usuario realista que permita recrear las condiciones que podrían surgir en un escenario real.

En resumen, el módulo de Propulsión permite:

1) Simular el procedimiento de puesta en marcha de la planta propulsora realizando las tareas:

- Previas al arranque
- Durante el arranque
- Durante el funcionamiento

2) Simular la operación de:

- Puesta a punto de todos los mecanismos que aseguren que la puesta en marcha de la planta propulsora se haga en las condiciones adecuadas (acciones previas)
- Arranque de la planta motriz de la unidad (uno o dos ejes)
- Maniobras de incremento / decremento de RPM
- Operaciones con uno y dos ejes de propulsión, en diferentes condiciones de navegación (desde la más a la menos favorable)
- Operación normal y en caso de fallas o emergencias.

En tanto que el módulo de Generación permite:

1) Simular el procedimiento de puesta en marcha de los moto-generadores de la unidad, realizando las tareas:

- Previas al arranque
- Durante el arranque
- Durante el funcionamiento

2) Simular la operación de:

- Maniobra de conexión / desconexión del generador a barras.
- Puesta en paralelo de generadores.
- Reparto de cargas.
- Comportamiento en transitorios.
- Maniobra de conexión con toma de tierra.
- Operación normal y en caso de fallas.

Finalmente, la consola del instructor cuenta con una interface de usuario que permite iniciar, operar y detener el adiestrador, seleccionar que tipo de adiestramiento se desea realizar (generación / propulsión), establecer condiciones para un ejercicio en particular y visualizar en su pantalla todas las acciones que lleva a cabo el alumno durante el mismo.

En mayor detalle, una somera lista de las actividades que se reparten entre los módulos de Generación y Propulsión es:

- Consideraciones y acciones previas (12 horas antes) a la zarpada
- Verificaciones y acciones en el calentamiento de máquinas, previo a zarpar
- Verificaciones y acciones en navegación en distintas condiciones (por estado de mar, remolque, un eje, etc.)
- Control de motores propulsores desde el Cuarto de Control de Máquinas
- Incidencias:
 - Pérdida de potencia de motor propulsor
 - Falla de combustión en puesta en marcha de motores diésel
 - Variación de velocidad de los motores principales
 - Aumento anormal de la temperatura del aceite
 - Aumento anormal de la temperatura del agua del circuito de refrigeración de motores propulsores o de generación
 - Caída de presión de aceite

- Caída de presión de agua de refrigeración de motores propulsores
 - Excesiva temperatura de gases de escape de los motores.
- Puesta en marcha de un generador desde la condición de “blackout”
 - Puesta en marcha de generadores adicionales
 - Balance de cargas cuando hay más de un generador en servicio
 - Toma de energía desde tierra
 - Detección y manejo de sobrecargas
 - Puesta en servicio de equipos para una misión específica de la unidad
 - Apagado de generadores

4. Descripción de entorno real

El conjunto de Generación/Propulsión de una MEKO 140 cuenta con 3 generadores principales, uno de emergencia y una planta propulsora con dos motores diésel de dieciséis cilindros cada uno. Cada motor impulsa una hélice a través de una línea de eje.

Cada una de estas secciones (generadores, línea de ejes, sistemas de control, etc.) dispone de una serie de indicadores y sensores (presión, temperatura), alarmas y controles de estados que permiten apreciar y controlar su funcionamiento, detectar y solucionar problemas.

El conjunto propulsor de cada hélice está conformado por:

- Palanca de comando para control de las revoluciones por minuto (RPM)
- Regulador de inyección de combustible
- Cremallera o inyector de combustible en cada cilindro
- Realimentador de RPM del eje al regulador de inyección
- Sistema de monitoreo de escape de gases
- Sensores y alarmas varias: temperatura de gases de escape, presión y temperatura de líquido refrigerante y de aceite, etc.

Los motores están gobernados por reguladores encargados de administrar la inyección de combustible que mantiene, aumenta o disminuye las RPM que se transmiten al eje (hélice) y, finalmente, impulsan la unidad.

No toda la potencia generada puede aprovecharse (en términos de su expresión en velocidad) ya que a la unidad debe vencer fuerzas de resistencia al avance producidas por el medio y otras generadas por el movimiento de la hélice en el agua.

Cuando el operador acciona el mando que regula las RPM, el regulador de inyección compara la lectura del mismo con las que le entrega el realimentador y trata de igualar los valores. Si no lo consigue (cuando queda por debajo del valor solicitado), entra en un estado de sobre exigencia que, eventualmente, se traducirá en los sensores y alarmas disponibles. En ese caso, el operador deberá tomar una serie de acciones para superar ese estado de cosas y retornar a condiciones más estables, esto es, mantener los valores de sensores e indicadores dentro de los rangos normales que aseguren un correcto funcionamiento en el tiempo.

Para estar en condiciones de arrancar un propulsor, deben cumplirse varios pasos para poner a punto todos los circuitos de alimentación de combustible, lubricación y refrigeración a fin de asegurar el correcto funcionamiento de la planta propulsora. Estos pasos se denominan Condiciones Previas y están implementados en un módulo que puede ejecutarse en forma independiente del módulo de Propulsión.

5. Descripción modular del adiestrador

De lo expresado en el párrafo anterior se puede expresar el adiestrador en forma de “caja negra” al efecto de tener una visión gráfica.

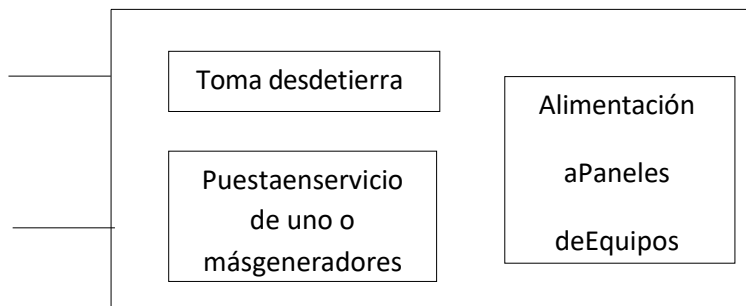
Por definición, hay dos módulos independientes que no se ejecutan simultáneamente: Generación y Propulsión.

Generación comprende la provisión de electricidad a una unidad para la alimentación de sus equipos.

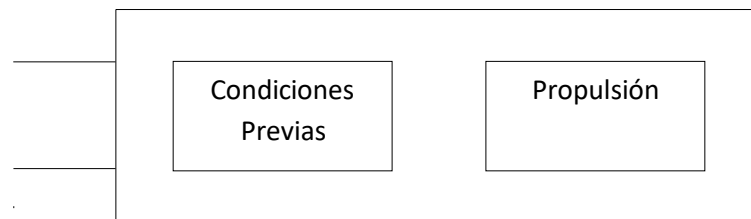
Se divide en la toma desde tierra, cuando la unidad está en puerto, o con sus propios generadores cuando está en navegación o en puerto, aunque en este caso no puede tener alimentación de ambas fuentes simultáneamente.

A su vez, Propulsión se divide en dos sub módulos que sí pueden ejecutarse en serie o por separado, en función de las necesidades de adiestramiento. Dichos sub módulos son Condiciones Previas y Propulsión.

- Generación



- Propulsión



Módulo de Propulsión

1. Generalidades

Esta parte del documento describe las características de los sub módulos que simulan Propulsión.

2. Condiciones Previas: Consideraciones de la implementación

Este módulo implementa las consignas que constituyen las operaciones previas al arranque de los motores principales de una unidad MEKO 140. El método de implementación elegido consiste en mostrar los distintos planos esquemáticos que ilustran los diversos circuitos de lubricación, refrigeración, etc. con elementos tales como generadores, compresores, tanques, llaves y válvulas (entre otros) que deben colocarse en determinado estado antes de proceder con la puesta en marcha. Los elementos se denominan, en general, actuadores (porque se debe actuar sobre ellos) y es función del alumno ubicar el esquema correcto en pantalla e ir colocando cada actuador en el estado que corresponda según la consigna, que puede consultar en un documento disponible en el segundo monitor de su estación de trabajo.

Según especificaciones de diseño de este módulo, el alumno debe seguir el orden indicado en la consigna. Cada paso (de un total de 38, aproximadamente) consta de una serie de operaciones básicas (abrir o cerrar una llave o válvula, poner en marcha

un generador, etc.) que pueden hacerse en cualquier orden, pero debe respetarse la secuencia en que están indicados los pasos, sin retroceder ni omitir alguno.

El programa no impide que el alumno ejecute los pasos en cualquier orden ni advierte si quedaron actuadores sin activar, pero sí le indica tales faltas al Instructor, que aprecia en su pantalla un resumen de cómo va ejecutándose cada paso y una imagen con el esquema actual sobre el que está actuando el alumno.

Una vez finalizados todos los pasos, el programa le informa al alumno el resultado sin abundar en detalles sobre los errores cometidos, en caso de que los hubiera. Informar los errores es una tarea reservada al Instructor, que dispone de información de detalle para indicar dónde se equivocó y sus eventuales consecuencias en el funcionamiento del sistema.

Para conocer detalles del módulo, véase el punto Interfaces del módulo de Condiciones Previas.

3. Propulsión: Consideraciones técnicas y matemáticas de la implementación

La planta motriz desarrolla una potencia (expresada en kilowatts (kW)) en función de la cantidad de combustible inyectada en cada cilindro. Esta inyección se sintetiza en una expresión conocida como apertura de cremallera; la potencia resultante se transmite a un eje en cuyo extremo se encuentra la hélice propulsora lo que resulta en el movimiento de la unidad a una velocidad que se expresa en nudos (millas / hora).

Sin embargo, no toda la potencia generada es aprovechable porque es necesario vencer tanto la inercia propia del peso de la unidad como la resistencia del agua sobre el movimiento de las palas de la hélice. Esta resistencia varía en función de factores tales como el estado de mar, la corriente, si la unidad está remolcando un peso, etc.

Con el propósito de modelar esta situación, se clasificaron las condiciones de operación de la planta motriz en cinco (5) casos posibles, donde el primero es el más favorable (condición de franquía, en la que se aprovecha mayor cantidad de potencia generada), el cuarto el más desfavorable y el quinto corresponde a propulsar con un solo eje o motor.

En este contexto fueron obtenidas expresiones, para cada condición, que representan las curvas de demanda de potencia (figura 1), la velocidad desarrollada por la unidad

y la apertura de cremallera, en todos los casos en función de las revoluciones (rpm) de las líneas de ejes (figuras 2 y 3).

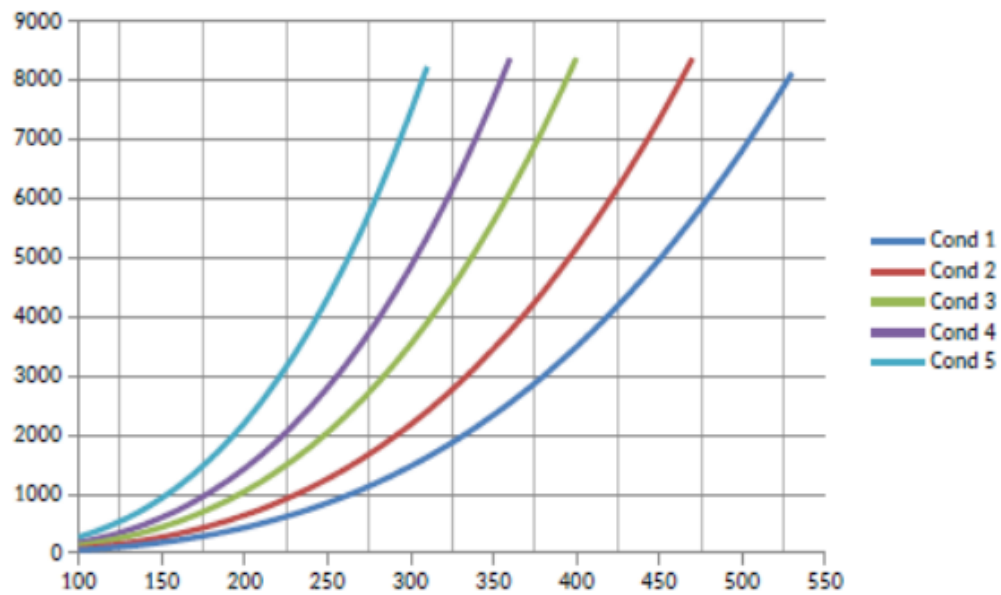


Figura 1: Curvas de demanda de potencia (KW) para cada condición

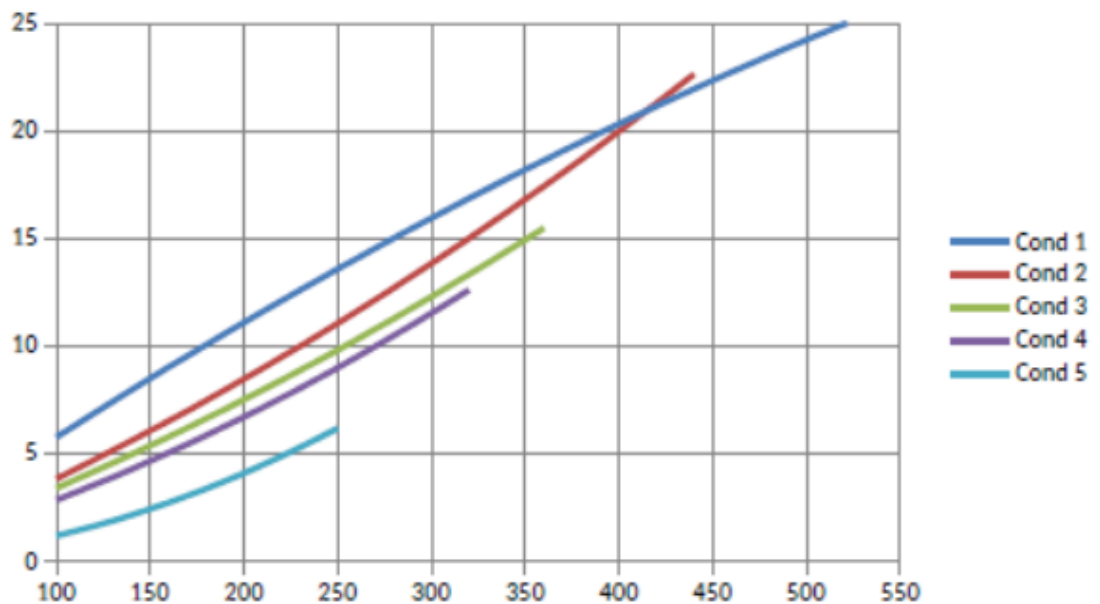


Figura 2: Curvas de velocidad (nudos) para cada condición

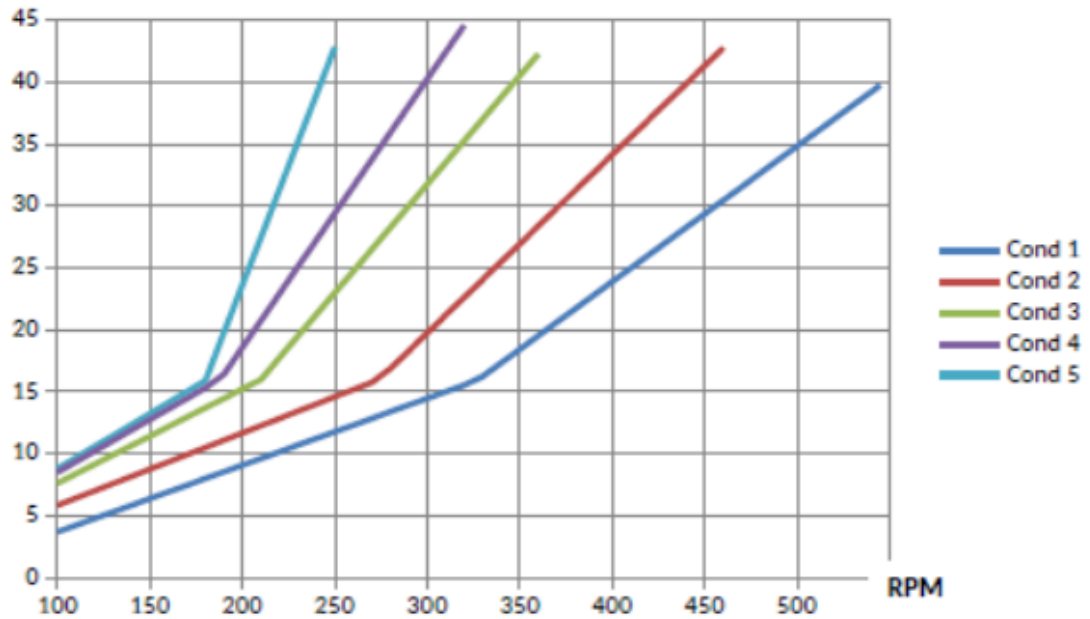


Figura 3: Apertura de cremallera (mm) para cada condición

Las curvas mostradas en la figura 1 responden a una ley cúbica del tipo

$$N_e \text{ (KW)} = K_i * (\text{RPM} / 100)^3$$

Donde N_e denota la potencia y K_i es una constante que depende de la condición. Habrá, en consecuencia, cinco (5) constantes. Obsérvese que a medida que aumenta el número de condición se obtiene cada vez menos potencia con las RPM que desarrolla la planta motriz (esto es, el rendimiento es cada vez peor).

Por ejemplo, en la condición 1 se aprovecha prácticamente toda la potencia ya que a 520 RPM (lo máximo que la planta motriz genera) se obtiene la potencia máxima (aproximadamente 2×7600 KW).

Si se compara esa curva con la condición 4, se aprecia que apenas superadas las 350 RPM ya la planta motriz está al máximo de su capacidad. Recordar que la condición 5 es con un solo eje.

Para comprender mejor este fenómeno, es necesario mencionar que las RPM finales dependen no solo de la inyección de combustible sino también de la resistencia que le ofrece el agua, la condición del mar, si la unidad está arrastrando un peso, etc.).

La figura 2 muestra las curvas de velocidad en función de las RPM, según la condición. Nuevamente, en la más favorable se aprecia que la unidad llegará al

máximo de velocidad (unos 25 KNT) cuando la planta motriz entrega la máxima potencia al tope de las RPM. A medida que empeoran las condiciones, se observa que se obtiene menor velocidad final y que el valor máximo de revoluciones es cada vez menor, nuevamente por la resistencia ejercida por el medio.

En este caso, la aproximación se hará mediante una expresión cuadrática del tipo

$$V_s = (\text{RPM} / 100) * (A_i * (\text{RPM} / 100) + B_i)$$

Donde A_i y B_i son los coeficientes de un polinomio de segundo grado, específicos para la i -ésima condición.

Finalmente, la figura 3 muestra cual es la apertura de cremallera (esto es, la cantidad de combustible) necesaria para determinado valor de RPM, según la condición. En este caso, la solución en expresiones continuas se hará mediante dos rectas:

$$Cr (\text{mm}) = M_i * \text{RPM} + B_i$$

Donde M_i y B_i son constantes propias de la i -ésima condición.

Con las expresiones mostradas hasta ahora, más el agregado de la temperatura de gases de escape y las RPM del sobre alimentador, es posible recrear el funcionamiento de la planta motriz en forma continua en el tiempo, con la posibilidad de variar las RPM y la condición de navegación en tiempo real, apreciar sus efectos en el rendimiento y los efectos en la velocidad final.

4. Gases de escape y turbo-sobrealimentador

En el estudio para desarrollar un adiestrador de la planta impulsora no basta considerar únicamente la planta motriz y el conjunto eje – hélice. Existe un par de dispositivos cuyo desempeño se tiene en cuenta en el funcionamiento general: el medidor de temperatura de gases de escape y las revoluciones del turbo sobrealimentador que provee el aire a presión para el proceso de combustión en los cilindros.

Hay una relación directa en el funcionamiento de ambos: a mayor temperatura de gases de escape, mayor cantidad de RPM del turbo-grupo lo que resulta en una mayor cantidad de suministro de aire.

Para incluir estos dispositivos en la simulación, se formularon sendas ecuaciones en base a expresiones polinomiales, surgidas del ajuste de datos relevados.

En el caso de la temperatura de gases de escape, la fórmula es

$$T (\text{°C}) = \beta * \text{RPM} + C_i$$

Donde: $\beta = 0.25$ si la cremallera $\leq 100\%$ (hasta de 37 mm)

2.0 si la cremallera $> 100\%$ (más de 37 mm)

C_i es una constante que depende de la i -ésima condición

RPM es la cantidad de revoluciones del motor principal

Para las revoluciones del turbo aspirador, tendremos

$$n = 4.9 * \text{Crem}^2 + 16 * (\text{RPM} - 330) + 5000$$

Donde: RPM es la cantidad de revoluciones del motor principal.

Crem es el valor actual de la cremallera para el eje en cuestión

El apéndice I detalla las expresiones que aproximan los valores para cada caso (potencia, velocidad, cremallera) y cada condición.

También están los valores de los coeficientes C_i para la temperatura de los gases de escape.

5. Solución informática y algoritmos de Propulsión

El modelo toma como hipótesis que las revoluciones del eje varían en el rango [100, 520] y que la cremallera lo hace entre los valores [0.0, 37.0] milímetros (mm). También se expresa su valor en porcentajes (37 = 100%).

El valor de cremallera tiene dos particularidades: la primera es que a los efectos prácticos no se considera razonable un valor por debajo del 10% o 3.7 mm; la segunda es que bajo ciertas condiciones se admite una “sobrecarga” o sobre inyección de combustible de hasta el 15%, lo que lleva su valor máximo a 42.55 mm.

Con estas hipótesis, en la condición más favorable (la 1), se tienen los siguientes valores:

100 RPM ____ 3.7 mm de cremallera (10%) ____ 54.6 kW de potencia

520 RPM ____ 37 mm de cremallera (100%) ____ 7600 kW de potencia

Observemos que:

a) La potencia de 7600 kW es la máxima que puede generar cada motor diésel de

la planta motriz al máximo de RPM (520);

- b) Según se desprende de las curvas de la figura 1, a medida que empeoran las condiciones de navegación la potencia máxima se conseguirá a menos RPM, lo que se traducirá en menor velocidad final.

En resumen, examinando las curvas se concluye que, si a 400 RPM en la condición 1 la unidad desarrolla 19 nudos a una potencia aproximada de 3500 kW, en la condición 3 ni siquiera podrá llegar a ese valor de RPM ya que la potencia máxima la tendrá a 330 (aproximadamente) y su velocidad será de unos 14 nudos.

En base a lo expuesto hasta aquí, la solución informática para simular la planta motriz consiste en una única aplicación que, en tiempo real, reacciona a las indicaciones de cambio de RPM que el operador indica desde la palanca o al cambio de condición que indicará el instructor.

La figura siguiente muestra el diagrama de estados del módulo de propulsión.

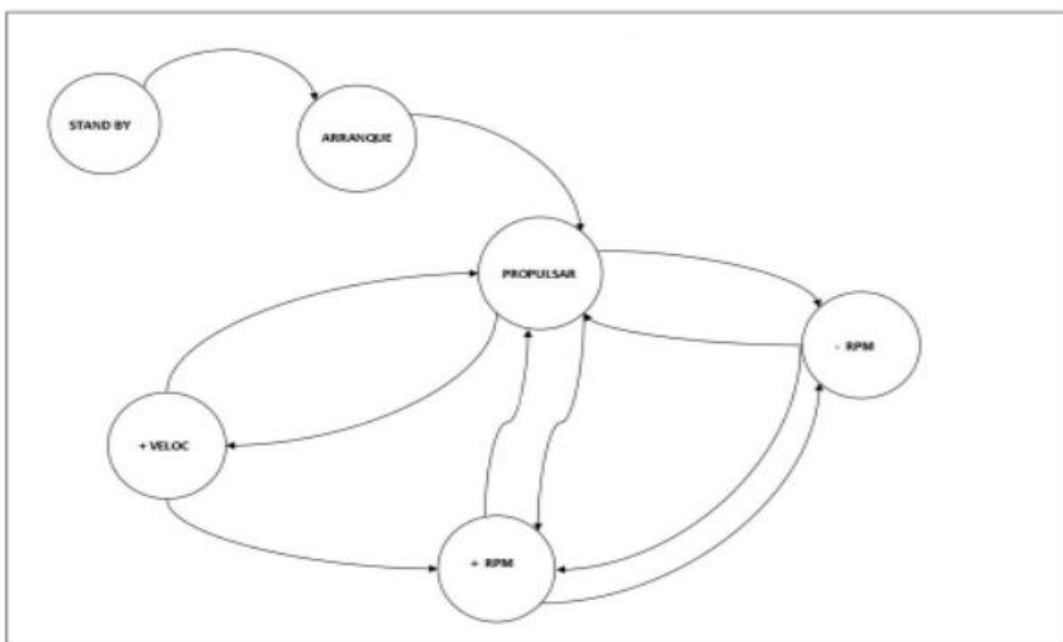


Figura 4 – Diagrama de estados del Módulo de Propulsión

El pasaje de un estado a otro (una transición) se verifica ante una determinada acción o condiciones:

- **STAND BY:** es el estado inicial cuando arranca el módulo, a la espera de una acción del instructor;

- **ARRANQUE:** cuando recibe la orden de iniciar, el algoritmo simula esta situación con una inyección brusca de combustible (40%) que luego desciende paulatinamente hasta el 10% mientras las RPM llegan al valor 100, y allí pasa al estado siguiente;
- **PROPULSAR:** representa el estado normal de funcionamiento cuando las RPM solicitadas desde la palanca han sido alcanzadas y la planta motriz está entregando la potencia que corresponda según la condición de navegación. En este estado se puede variar la condición, y aumentar o disminuir las RPM. Es el estado de “equilibrio” de la simulación, a la que vuelve una vez cumplida una orden de cambio de RPM o de condición. En la figura eso se denota con los conectores que parten desde cualquier otro y terminan aquí;
- **+ RPM:** se pasa a este estado cuando el operador ordena un aumento de las revoluciones. La simulación analiza si es posible llegar al valor solicitado en función de la condición actual de navegación y el valor de la cremallera: si es menor al 100% o si es mayor y está habilitada la sobrecarga. Cuando no puede cumplir con el valor, queda fijo en el máximo que la condición le permite y transiciona a PROPULSAR;
- También pasa a + RPM si el cambio de condición es a una más exigente (de la 1 a la 3, por ejemplo). En este caso habrá una caída del 10% de las RPM actuales que se intentarán recuperar en un tiempo breve (segundos) para dar a entender el efecto, pero sin que el proceso sea muy extendido en el tiempo;
- **RPM:** se pasa a este estado cuando el operador ordena una disminución de las revoluciones. El algoritmo va actualizando los valores de cremallera, RPM y velocidad final con una periodicidad de un (1) segundo.
- **+ VELOC:** es una consecuencia de un cambio hacia una condición más favorable (de la 3 a la 1, por ejemplo), lo que provoca un aumento de velocidad, pero sin cambiar las RPM. El algoritmo toma como base el valor actual de las revoluciones y determina los valores de cremallera y velocidad final que correspondan a la nueva condición. La variación se hace a unos 0.25 nudos/seg, y cuando llegue a la velocidad calculada, la cremallera también tendrá el valor adecuado. La transición a + RPM se produce en el caso especial en que, por la mejora en la condición, ahora es posible llegar a un valor de RPM que en la anterior no podían cumplirse por haber llegado al límite de potencia.

Nota: los cambios de condición sólo pueden hacerse cuando la simulación está en el estado PROPULSAR, esto es, no se está cumpliendo una orden, pero +/- RPM puede hacerse en cualquier momento, es decir que, si el operador ordenó un aumento y lo considera exagerado, puede reducir el valor aun cuando la orden esté en ejecución.

Ver el apéndice II para detalles de implementación del algoritmo de simulación.

6. Interface del alumno para el módulo de Condiciones Previas

Cuando el Instructor inicia un ejercicio, la estación del alumno (que cuenta con dos monitores) muestra en uno de estos una pantalla similar a la figura 5. Esta imagen permite apreciar un esquema cuyo significado se lee al pie de la misma y, en el sector marcado por la elipse, las distintas solapas con las opciones del módulo.

En particular, interesa la última (VerDocum) la que, si se activa el control que aparecerá en pantalla, mostrará en el segundo monitor el documento que contiene las consignas que el alumno debe ejecutar y el orden en que debe hacerlo; de esta manera, no sería necesario llevar escritos o recordar de memoria.

El alumno deberá identificar por cuál esquema debe iniciar el procedimiento, y a partir de allí seguir la secuencia indicada en el documento. El instructor podrá seguir en su estación la evolución y hacer las observaciones que considere convenientes.

La figura 6 muestra otro esquema con todos los actuadores ya activados por el alumno. En este caso, se trata de abrir y cerrar válvulas, de allí las letras "A" o "C" rodeadas por un círculo en color.

Como ya fue dicho, el módulo del alumno no avisará los errores de procedimiento en el momento en que los cometa. Sin embargo, esa información sí la puede conocer el instructor.

Otra característica de la interface es que aquellos actuadores que no forman parte del procedimiento no pueden ser activados; es decir que un click sobre ellos no produce efecto alguno.

Existen otros formatos para los actuadores: ingresos numéricos o controles deslizantes, por ejemplo, cuando el procedimiento requiera indicar presiones, niveles de aceite, etc.

Por último, la disposición en solapas permite pasar fácilmente de un esquema a otro, sin perder el estado de los actuadores que han sido activados en cada solapa.

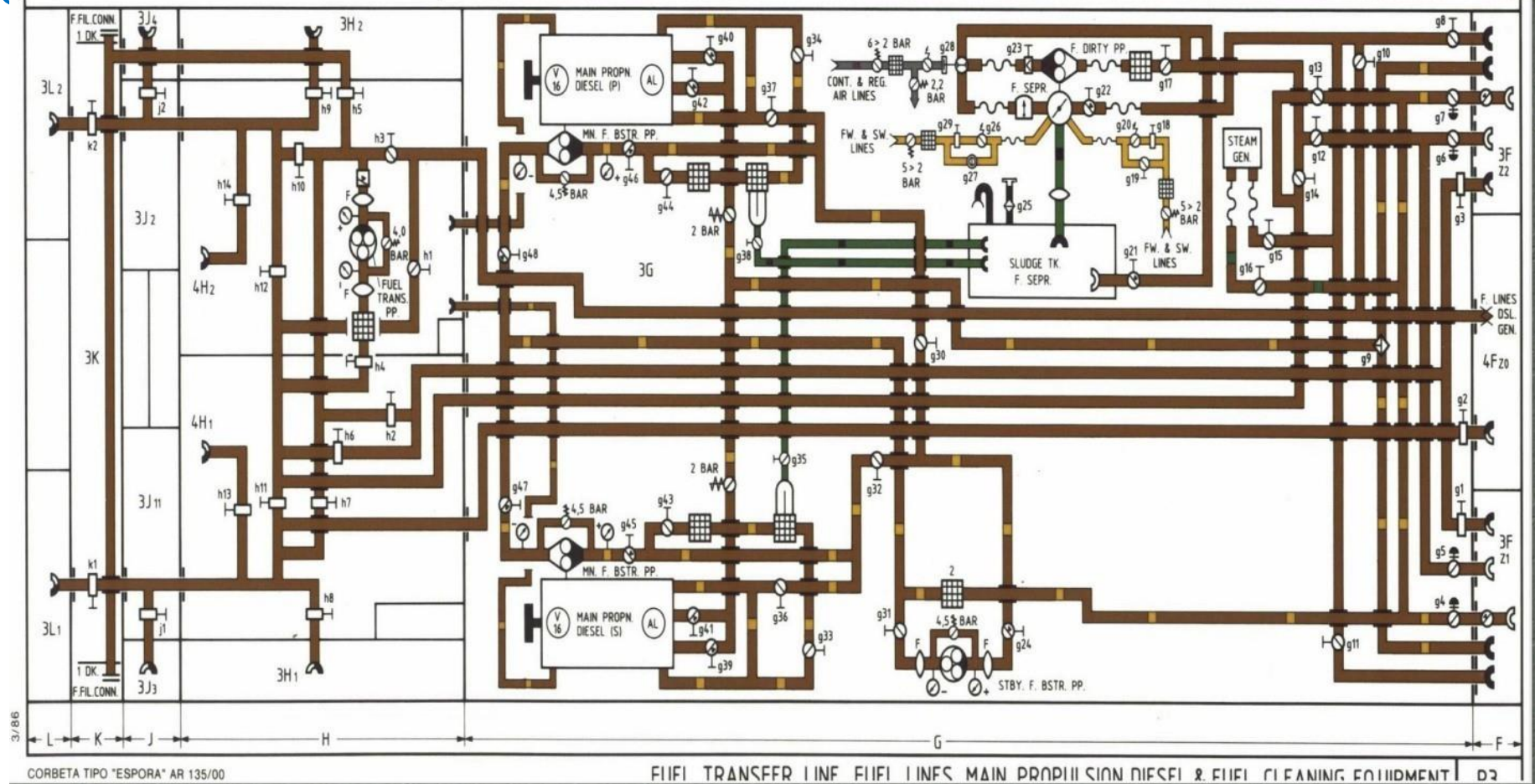


Figura 5: Esquema 3 sin actuadores activados, tal como se le presenta al alumno.

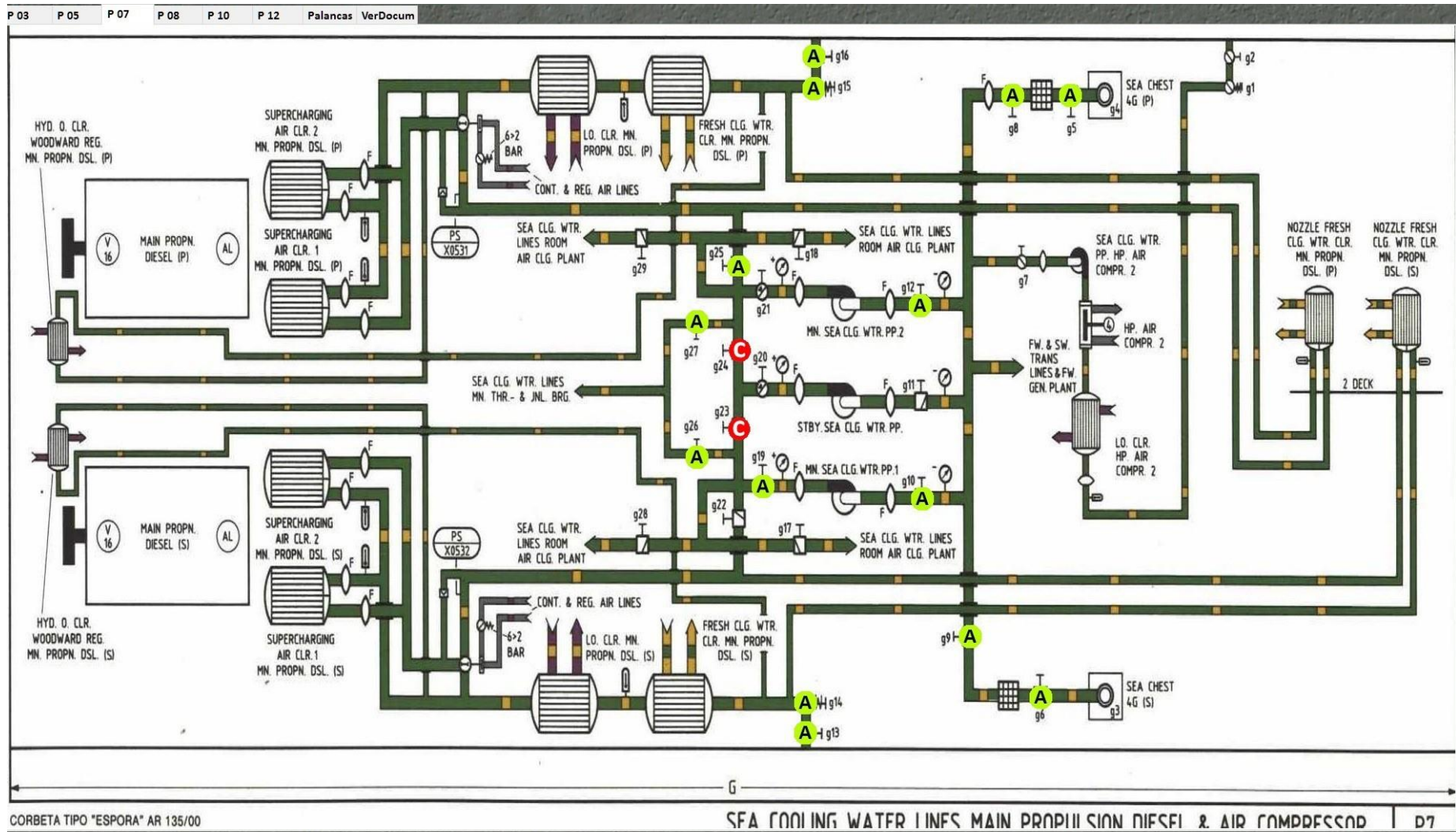


Figura 6: Esquema 7 con actuadores activados

7. Interface del alumno para el módulo de Propulsión

Este módulo tiene solamente una pantalla que, en caso de contar con la palanca de control de RPM, no tiene controles para el ingreso de datos. Ver figura 7.

La organización de la pantalla es una división en tres paneles: uno para cada banda y el central para mostrar el indicador de velocidad y algunos valores informativos para el alumno. También se encuentra allí un control numérico de las RPM que debe usarse en caso de no contar con la palanca.

El control central aplica el valor sobre ambos ejes simultáneamente, aunque existen los controles individuales en caso de que se desee actuar sobre uno solo, por ejemplo, si se está navegando con un solo eje.

El panel de cada banda muestra los indicadores de cremallera, RPM, presión de aceite, temperatura de gases de escape, de agua de camisas y las RPM del turbo.

El indicador de sobrecarga de cremallera actúa tanto como un aviso del estado actual (mediante cambios en el color y el texto) o un botón para habilitar/deshabilitar la sobrecarga en caso de no contar con la palanca.



Figura 7: Pantalla de Control de Propulsión

8. El puesto del Instructor: características y funciones

La estación de trabajo del instructor cuenta con una PC y dos monitores. Esta configuración y el hecho de estar conectado en red con la estación del alumno le permiten iniciar, supervisar y finalizar un ejercicio.

Existen dos modos de trabajo: uno para el módulo de Condiciones Previas y otro para el de Propulsión; es posible iniciar un ejercicio por cualquiera de los dos yendo a la solapa correspondiente y activar el control para ejecutar el módulo en la estación del alumno.

9. Interfaces del módulo del Instructor

- **Supervisión de Condiciones Previas**

La figura 8 muestra una de las pantallas de las que dispone el Instructor para la supervisión de un ejercicio con este módulo. La segunda pantalla se activa con la tecla cuyo texto es “Ver Paneles de Condiciones Previas”, y muestra el esquema que en ese momento el alumno tiene en pantalla, aunque en todo momento el Instructor puede ver cualquiera de ellos ya que dispone de las facilidades de solapas idénticas a las del alumno.

Sin embargo, el instructor podrá ver pero no modificar el estado de los actuadores en cada esquema.

La grilla a cuatro columnas contiene una lista de todos los pasos indicados en el documento que detalla la secuencia de éstos. Obsérvese que hay números faltantes; esto se debe a que algunos pasos no tienen su equivalente en acciones que puedan hacerse en una PC. Por eso, durante la ejercitación el instructor decidirá cuál es la mejor manera para verificar su cumplimiento.

Las tres columnas relacionadas con los actuadores permiten conocer en el momento cómo el alumno va ejecutando las acciones de cada paso, y brindan una visión en tiempo real de lo que falta y cuántos actuadores están en un estado incorrecto. Además, mediante un click en un número en esa columna, se verán en el cuadro inferior (Errores en Actuadores dentro de un Paso) una explicación por cada uno que no se encuentre en el estado correcto.

El cuadro superior (Errores de Secuencia entre Pasos) está destinado a indicar los errores que comete el alumno al avanzar en la secuencia de pasos; por ejemplo, olvidar la activación de un actuador o equivocarse el orden de pasos indicado en el documento.

Condición Previa Proposición

Finalizar Condiciones Previas Ver Paneles de Condiciones Previas

Paso	Actuaciones	Procesados	Incorrectos
Paso 06	16	6	
Paso 07	2		
Paso 08	16	3	
Paso 09	12		
Paso 10	10		
Paso 13	2	2	2
Paso 14	3		
Paso 16	6		
Paso 18	2		
Paso 19	4		
Paso 21	2		
Paso 26	2		
Paso 27	2		
Paso 30	2		
Paso 32	2		
Paso 34	6		
Paso 35	1		
Paso 36	3		
Paso 37	5		
Paso 38	1		

Errores de Secuencia entre Pasos

Paso [08] Pagina [08] Actuador [114] → El Paso anterior NO está completo

Errores en Actuadores dentro de un Paso

Figura 8: Pantalla del Instructor (Condiciones Previas)

- **Supervisión de Propulsión:**

La figura 9 permite apreciar la pantalla que tiene el instructor para supervisar el ejercicio de Propulsión.

La parte izquierda está dedicada a mostrar (en números y por eje) los valores de los distintos indicadores de la pantalla del módulo de Propulsión en la estación del alumno. En todos los casos, no es posible para el instructor modificar estos valores.

El cuadro con el texto PROPULSANDO muestra que la unidad está en tal situación, tratando de llegar a las RPM ordenadas. Las flechas ascendentes en color verde indican que las revoluciones están aumentando.

Además, los carteles en rojo con porcentajes al lado de los indicadores de presión de aceite y de temperatura de gases indican que el instructor ha provocado las incidencias que afectan los valores en el porcentaje mostrado.

Obsérvese también que las incidencias distintas afectan a ambos ejes.

Debajo, se aprecia el control para el cambio de condición, que permanece oculto cuando el estado de la simulación es tal que no permite alterar la condición actual.

La parte derecha está dedicada a las incidencias (se explican más adelante). Aquí el instructor dispone de una sencilla interface para alterar valores en los indicadores de Presión de Aceite, Temperatura del Agua de Camisas y de la Temperatura de Gases de Escape.

También se muestran tres relojes indicadores: RPM de cada uno de los ejes y la velocidad de la unidad, en todos los casos copia de las representaciones en la pantalla de alumno.

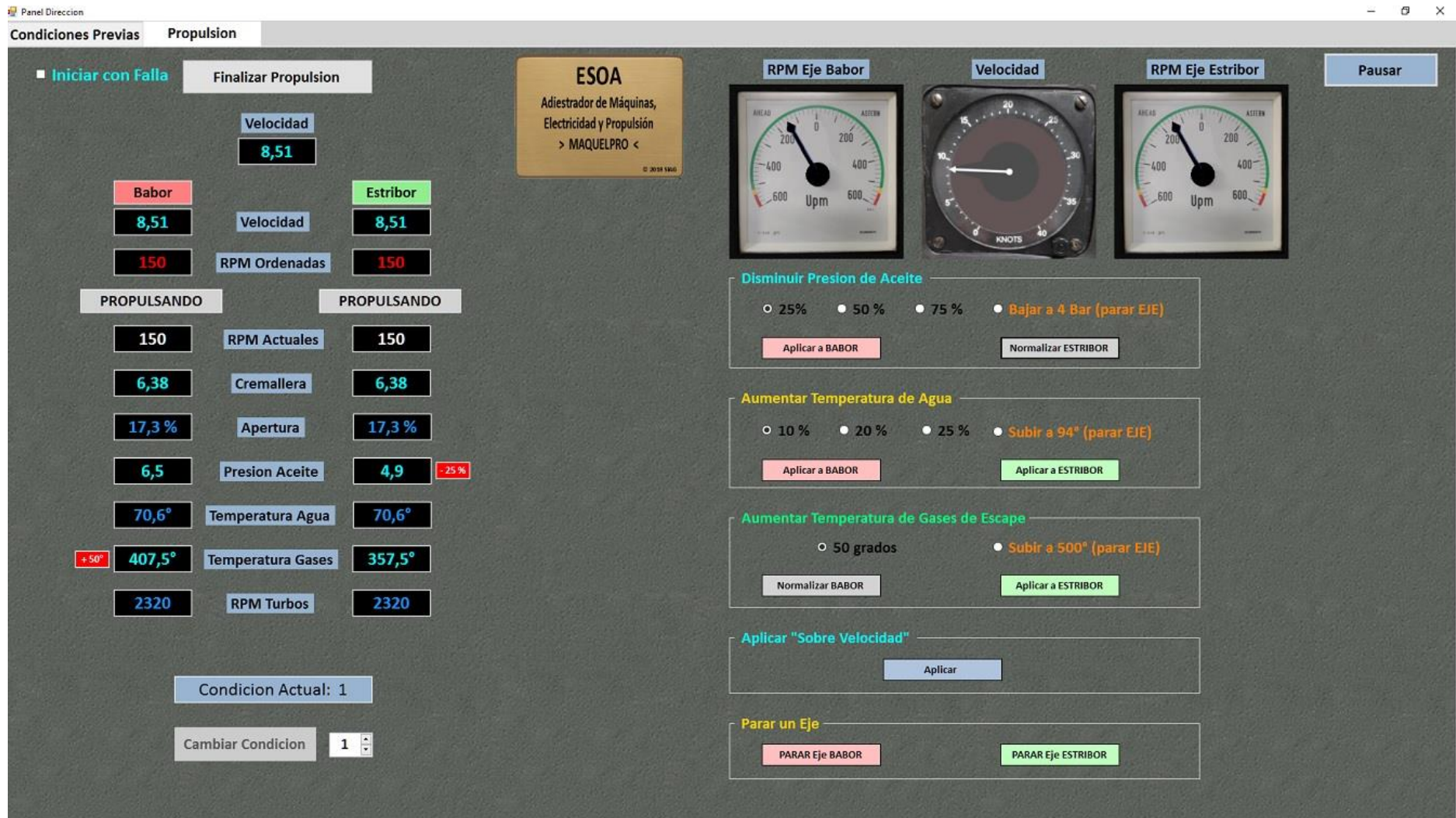


Figura 9 - Pantalla del Instructor (Propulsión)

10. Incidencias: la intervención del instructor durante un ejercicio

Dado que el modelo simula un proceso continuo en el tiempo, todos los indicadores muestran valores calculados en tiempo real en respuesta a las órdenes de variación de las RPM.

Además, por parte del Instructor, existe otra forma de afectar los valores de ciertos indicadores con la finalidad de simular una situación anómala que debería ser notada y corregida por el alumno. Ver la figura 9.

Los indicadores que se pueden afectar son:

- **Presión de Aceite:** Tres (3) opciones de caída de la presión, tomando como referencia el valor actual: 25%, 50% y 75% y una que fuerza la parada del eje. Todos los porcentajes se deben alcanzar en 20 segundos a partir del momento en que el Instructor marcó la incidencia. La normalización es indicada por el Instructor, y se alcanza en el mismo tiempo. La situación de caída a menos de 4 bar es una condición crítica que, de alcanzarse, provoca la irreversible parada del propulsor.
- **Agua de Camisas:** Tres (3) opciones de aumento de la temperatura (10%, 20% y 25%), tomando como referencia el valor actual, en 20 segundos, más otra que fuerza la parada del eje. La normalización es indicada por el Instructor, y se alcanza en el mismo tiempo. La situación de aumentar a 94° provoca la irreversible parada del propulsor.
- **Gases de escape:** para cualquier valor actual de este indicador, provocar esta incidencia aumenta la temperatura actual en 50° en 10 segundos. Cuando cesa la incidencia se normaliza la lectura en el mismo tiempo. La opción de aumentar gradualmente la temperatura hasta superar los 500° lleva a la parada irreversible del propulsor.

La opción marcada con “parar EJE” provoca un cambio en el indicador hasta un valor crítico que provocará la detención del propulsor de la banda afectada.

Las acciones correctivas, si el alumno notase la variación en los indicadores, consisten en accionar la palanca para cambiar el valor de las RPM o indicar el procedimiento que corresponda para el caso, si existe.

La “**sobre velocidad**” es una condición en la que el programa aumenta las RPM a una ratio de 13 RPM/seg, hasta un valor de 130. Este número se añade a las revoluciones calculadas, en forma incondicional. Al llegar a 130 y si el total de RPM es menor que 545, se invierte el comportamiento, esto es, se comienzan a restar 13 RPM/seg hasta agotar las 130 añadidas. Luego el ciclo recomienza y continúa hasta su normalización.

Si como consecuencia del añadido de RPM a las calculadas se superare las 545, el eje se detendrá en forma incondicional.

La incidencia se aplica o quita sobre ambos ejes simultáneamente, y si hay detención de alguno de ellos, tal estado resultará irreversible.

La opción de “**Parar un Eje**” permite al instructor detener en forma inmediata el propulsor de una banda, y no es reversible; esto es, no podrá volverse a poner dicho eje en condiciones normales de propulsión en lo que reste del ejercicio.

Esta opción también está disponible para el alumno en la palanca de comando de RPM, en los botones identificados como “**Parada Emergencia**” (**BB** o **EB**).

Otra acción que puede tomar el instructor es cambiar la **condición** de navegación (ver el párrafo Propulsión: Consideraciones técnicas y matemáticas de la implementación). El alumno notará un cambio en el cartel del panel central que muestra el número de condición y

simultáneamente habrá una variación en los relojes mientras los algoritmos generan los valores adecuados para la nueva situación, hasta lograr valores estables en el tiempo.

Módulo de Generación

1. Generalidades.

En esta parte serán descriptas la implementación y características del módulo de Generación de Electricidad para alimentar los distintos equipos de una unidad MEKO 140, tanto desde tierra como desde uno o más generadores propios, con indicación en tiempo real de consumo en amperios y kilovatios, control de sobrecargas, quite de cargas y salida de servicio de los generadores.

2. Implementación

El módulo consta de una estación para el alumno, con dos monitores, y otra para el instructor, con un único monitor.

La simulación implementa el encendido de los generadores desde una situación de “blackout” (falta total de energía a bordo de la unidad), su conexión a barra (el generador está en disposición para tomar cargas) y la representación de estas cargas en los indicadores (voltímetros, amperímetros, vatímetros) cuando se van encendiendo los distintos equipos (indicación de consumo). También es posible realizar la maniobra de tomar alimentación de tierra.

La carga es un valor aleatorio entre un mínimo y un máximo que varía para cada equipo, según indicación del fabricante. Esto permite que entre ejecuciones sucesivas no se repitan valores.

Cuando la carga acumulada (en kilovatios) se acerca al límite operativo indicado para ese generador, deberán ser encendidos uno o dos generadores adicionales y puestos a barra. El algoritmo de simulación se encarga de repartir la carga aleatoriamente (otorgando distintos valores para cada generador) y es responsabilidad del alumno balancear dichas cargas para que la misma se reparta equitativamente y la frecuencia de línea no se aparte de 60 Hz.

Cuando hay dos generadores puestos a barra la distribución de cargas se simula mediante una función lineal en base a la diferencia de frecuencias (aquel con la mayor tomará más carga). En el caso de tres o más generadores (una situación que podría presentarse cuando se tienen dos generadores en funcionamiento y se desea quitar uno de servicio sin apagar equipos, operación que debe ser cumplida mediante la puesta en servicio de otro generador para luego sacar de servicio el indicado), en el tiempo que los tres están puestos a barra se busca un reparto de cargas en base a otorgar más carga al generador con mayor frecuencia y viceversa.

También se tiene en cuenta el evento de sobrecarga. Esto ocurre cuando la lógica electrónica

de los generadores detecta un consumo igual o superior al 95% de la carga nominal tolerada. Cuando dicho consumo supera el 105%, se tiene otro tipo de sobrecarga.

En ambos casos, en la realidad se produce una desconexión automática de ciertas cargas en equipos llamados “no esenciales” (paneles 1 y 16). En el caso de la sobrecarga del 95%, se desconectan cargas de equipos indicados como “step I”. En la de 105%, se desconectan aquellos indicados como “step II”.

La toma desde tierra se simula con un procedimiento que combina indicaciones verbales (verificar la conexión de la línea de alimentación) con procedimientos que consisten en operar llaves y otros actuadores del panel 10.

Estas operaciones son reportadas en tiempo real a la estación del instructor, que dispone de un registro numérico y de mensajes para ver las acciones que lleva a cabo el alumno además del control de arranque y detención de la simulación en la estación del alumno.

3. Descripción de la interface del alumno

Cuando el programa es iniciado desde la estación del instructor, el monitor de la izquierda muestra el menú general, que se aprecia en la figura 10.

En tanto que el monitor derecho muestra el esquema del panel 8 en una disposición que mediante distintas solapas permite acceder al resto de los paneles. Desde Cargas Esenciales se accede a los paneles 2, 3, 4, 7, 11, 12, 14 y 15 y desde la solapa Cargas NO Esenciales a los paneles 1 y 16.

El panel 10 está dedicado exclusivamente a simular la toma de energía desde tierra

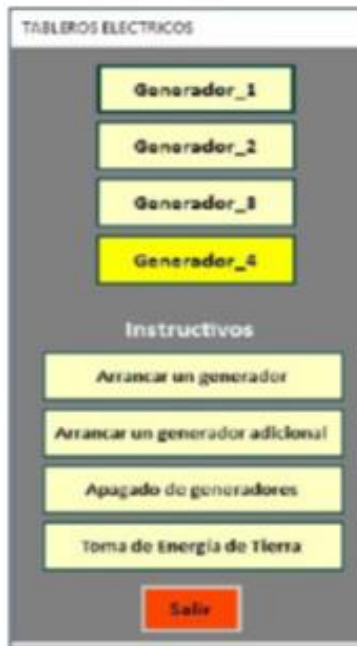


Figura 10 - Menú general de Generación, módulo del alumno, parte izquierda

Tablero Electrico Paneles Auxiliares

Panel 8 - Transferencia de Emergencia | Panel 10 - Toma de Tierra | Cargas Esenciales | Cargas NO Esenciales

Panel 08

The interface includes the following components:

- Gauges:**
 - Voltmeter (V): Scale 0-400, needle at 0.
 - Resistance gauge (kΩ): Scale 100-5, needle at 100.
 - Amperimeter (A): Scale 0-600, needle at 0.
 - Converter 3E Amperimeter (A): Scale 0-200, needle at 0.
- Switches:**
 - 852: LLAVE SELECTORA VOLTIMETRO (R-S, T-R)
 - 851: LLAVE SELECTORA AMPERIMETRO (R, T)
 - 855: PRUEBA AISLACION
 - 8001: LLAVE TRANSFERENCIA A TABLERO EGA
- Indicator Lights:**
 - 8H1, 8H2, 8H3, 8H4: Line transfer status (DISPARADO/CONECTADO)
 - 8H7, 8H8, 8H9, 8H10: Vertical stack of lights
 - 8H11, 8H12: Converter 3E status
- Initial Conditions Panel:**
 - Se recibió Ok del maquinista indicando que el motor diesel está listo para arrancar.
 - El interruptor 8Q01 está en ON y la lámpara 8H3 está APAGADA.
 - Resto de las lámparas: APAGADAS.

Figura 11 – Pantalla derecha de la estación del alumno al iniciar el programa

La figura 10 permite apreciar los controles para el encendido de cada uno de los generadores y el acceso a los instructivos que describen (en formato PDF) como es cada procedimiento. Estos documentos están disponibles en todo momento y se muestran en el segundo monitor, aunque su ventana puede reubicarse en cualquier lugar del primer o segundo monitores.

El generador 4 es el antes designado como de “emergencia”, aunque en el caso de las unidades MEKO 140 se ha integrado al nivel de los tres principales.

El proceso de toma de energía de tierra se accede desde la solapa Panel 10 – Toma de Tierra, en el monitor derecho.

Cuando se activa el control para arrancar un generador, aparece un formulario como el que muestra la figura 12, superpuesto al formulario base. Por simplicidad, en este documento se aprecia con el generador puesto a barra y con cargas aplicadas.

Teniendo en cuenta que se parte de una situación de blackout, el operador debe ir activando, con ayuda del mouse, los distintos controles hasta lograr poner el generador a barra. Luego, irá agregando cargas operando desde los distintos paneles en el monitor derecho.

Los generadores 1, 2 y 3 tienen una interface similar: es el mismo formulario con distinto color de fondo para facilitar la identificación, aunque hay carteles que indican el número de generador y el panel que lo contiene. El generador 4 tiene una interface ligeramente diferente (no cuenta en pantalla con el interruptor Q01) pero el proceso de puesta a barra y las indicaciones de los instrumentos son iguales a los anteriores.

Los formularios pueden cerrarse con el control usual de Windows [×] y volver a invocarse activando el control a la izquierda del formulario base. Obviamente, los valores de todos los indicadores se mantienen, aunque el formulario se cierre, ya que son actualizados permanentemente por el programa que actúa en segundo plano.

En relación con lo mostrado en la figura 12, podemos apreciar que el voltímetro a la izquierda indica que la tensión de línea es de 440 voltios, la carga es de unos 260 kilovatios o 400 amperes y que la frecuencia de línea está fuera de rango, producto de haber agregado una carga, y que deberá ser corregida mediante el regulador S3.

Las teclas con color intenso muestran el estado de “encendidas”.

Las acciones que realiza el alumno son reportadas a la estación del instructor y se muestran como mensajes o valores numéricos. Los mensajes son alertas por errores de procedimiento, y en general no impiden seguir adelante con la operación.

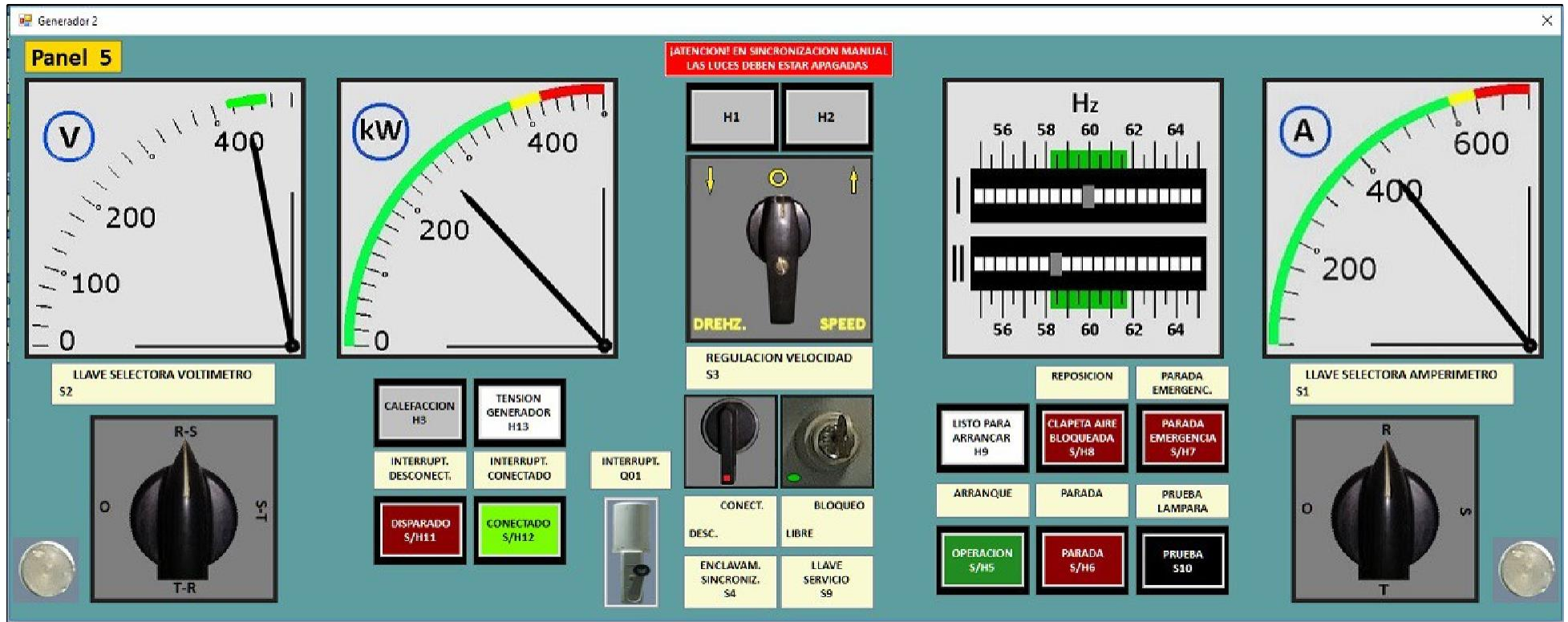


Figura 12 – Panel del Generador 2 en funcionamiento

A continuación (figuras 13 y 14) se muestran dos paneles con equipos donde se han aplicado cargas. La operación consiste en cambiar el estado de la llave (del 0 al I) para aplicar una carga generada en forma aleatoria por la simulación entre el valor mínimo y máximo indicado por el fabricante para ese equipo, o presionar el botón verde en caso de los paneles 1 y 16.

Para quitar la carga, basta con revertir el estado de la llave o botón correspondiente.

En la figura 13 (Panel 01 de cargas no esenciales) se aprecian dos equipos encendidos (GRUPO 2CO y GRUPO 3HO) con sus correspondientes cargas en amperes.

En la figura 14 (Panel 11 de cargas esenciales) se aprecia la activación de tres equipos (SONAR GROUP tiene una carga muy baja, según indicación del fabricante) en tanto que GROUP 3F y FAN GROUP 1GZ5 muestran su carga en los respectivos amperímetros. GROUP 1J0 está apagado.

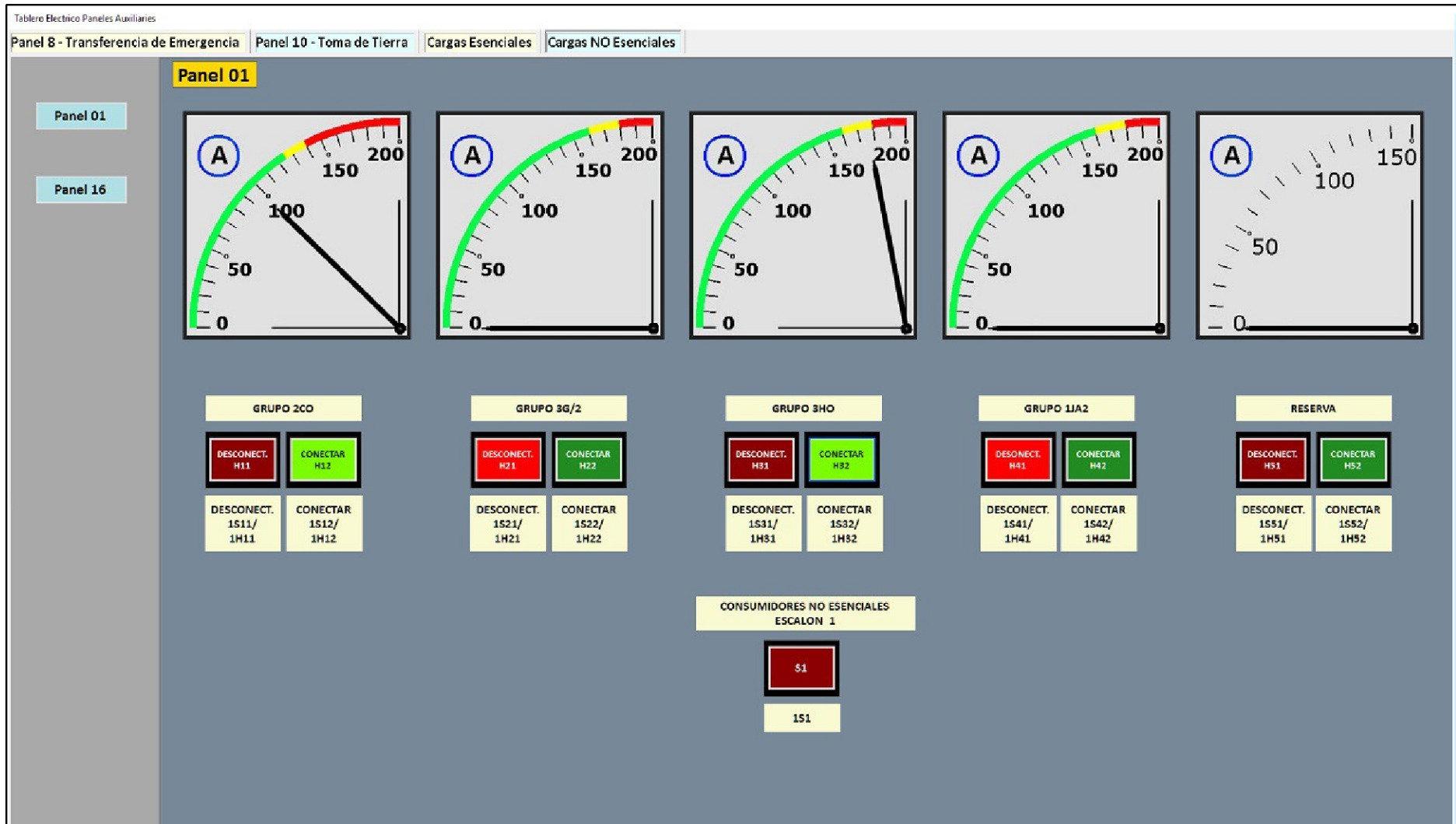


Figura 13 – Panel 01 de Cargas No Esenciales

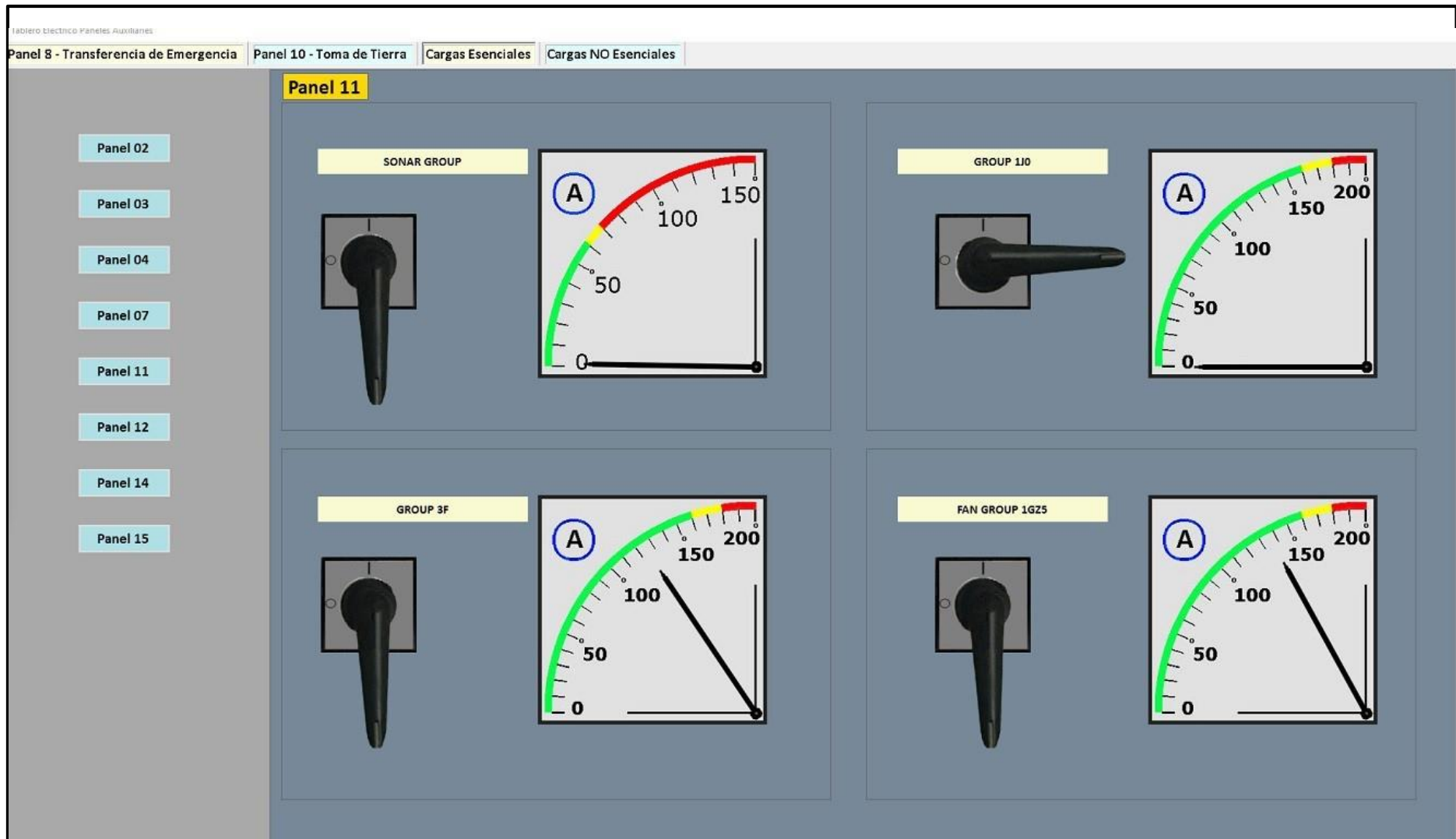


Figura 14 – Panel 11 de Cargas Esenciales

4. Descripción de la interface del instructor

En la figura 15 se aprecia la interface del instructor para el módulo de generación eléctrica. La misma ofrece una visión alfanumérica del estado de cada generador, con valores que cambian a medida que el alumno va operando sobre los distintos paneles.

En primer lugar, arriba a la izquierda se encuentra el control para arrancar o detener la aplicación que ejecuta en la computadora del alumno.

Están representados los cuatro generadores y la toma de energía desde tierra.

En las grillas de la derecha se muestran los nombres de las cargas activas, con indicación del valor en kw y el panel correspondiente.

El gráfico de barras inferior izquierdo detalla el reparto de cargas entre los generadores encendidos y puestos a barra. Refleja gráficamente los valores numéricos.

El cuadro inferior derecho muestra la secuencia de acciones realizadas por el alumno, que incluyen los pasos realizados, indicaciones de errores de procedimiento y también avisos de sobrecarga.

En particular, en la figura mostrada obsérvese que se ha cometido un error catastrófico ya que se comenzó tomando alimentación de tierra y luego se pasó a encender un generador SIN quitar la alimentación existente (interruptor Q01 pasado a OFF).

Este tipo de errores debe ser detectado por el instructor, y no ocasiona efectos en el programa de simulación.

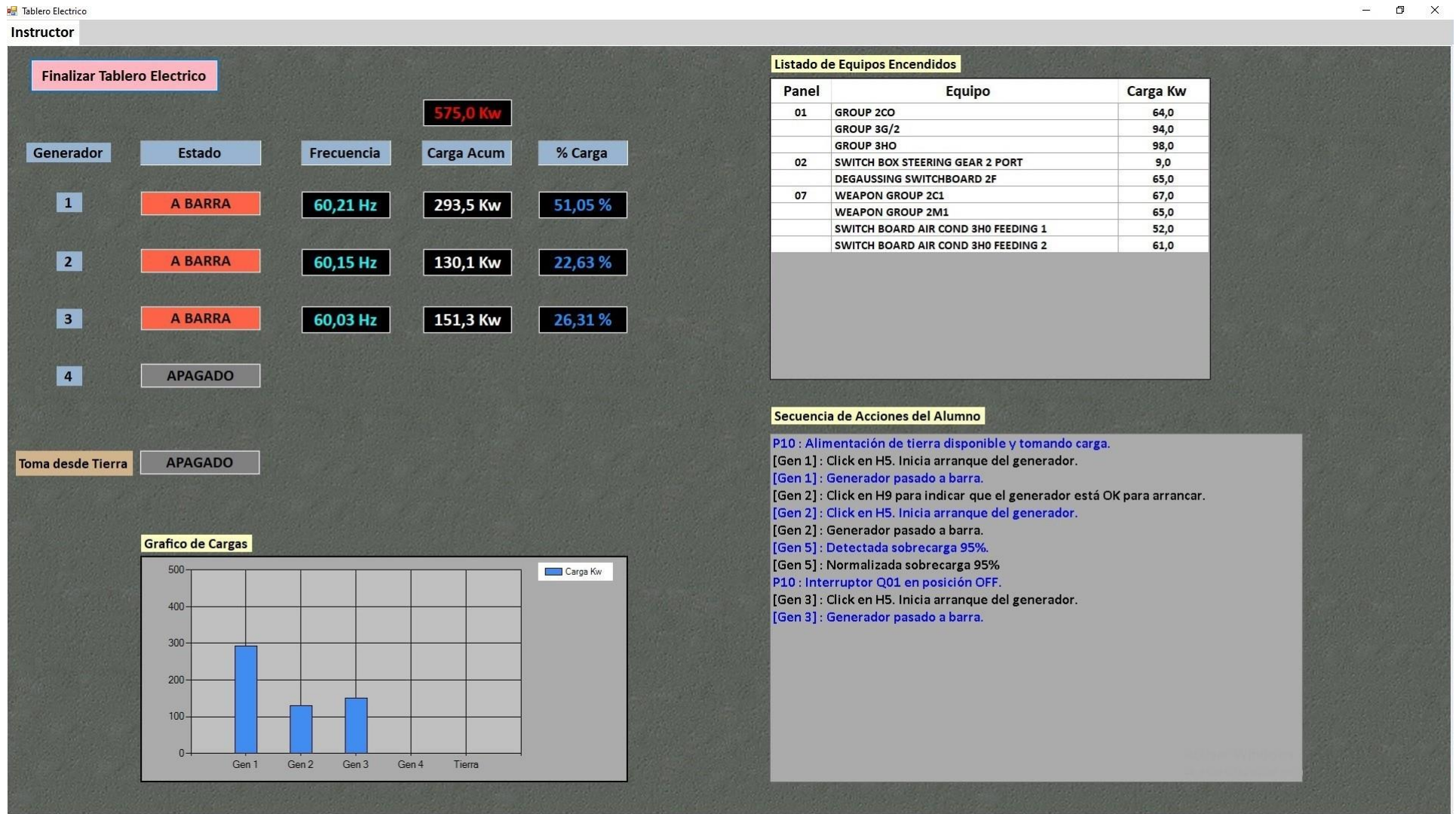


Figura 15 – Pantalla del Instructor del programa Tablero Eléctrico

Conclusiones

La enseñanza basada en el enfoque por competencias que adoptó en sus espacios curriculares la Sede Educativa Escuela de Oficiales de la Armada exige desarrollar un aprendizaje sobre las prácticas profesionales específicas de cada orientación.

En este sentido, y en el particular caso de la formación de oficiales en la especialidad Propulsión, es que se determinó la necesidad de contar con dispositivos de simulación que permitieran representar de manera fidedigna los sistemas de control de plantas propulsoras y de generación eléctrica de las unidades de superficie que dotan a la Flota de Mar, tanto en su visualización como en su funcionamiento, que serán futuro campo laboral de los egresados.

Esta necesidad dio lugar al proyecto de investigación **MAQUELPRO - Adiestrador de Máquinas Eléctricas y Propulsión para unidades MEKO 140**, acreditado y financiado por la Universidad para la Defensa (UNDEF), en el marco del programa UNDEFI.

La fundamentación teórica y los modelos fueron desarrollados por el personal docente del área de Propulsión y Máquinas Eléctricas de la Escuela de Oficiales de la Armada (ESOA), en tanto que el desarrollo informático fue asumido por el Servicio de Análisis Operativos, Armas y Guerra Electrónica de la Armada (SIAG).

Este trabajo colaborativo permitió arribar exitosamente a un dispositivo de simulación actualmente instalado en dependencias de la Sede Educativa que responde a las exigencias del proceso enseñanza – aprendizaje que persigue la institución.

Si bien para el diseño prototípico se trabajó sobre un buque específico, con intervención de los desarrolladores, se podrían replicar el resto de las unidades de la Flota de Mar.

Por otra parte, así como la concepción de este dispositivo de simulación ha sido la de una ayuda didáctica aplicada a la enseñanza, bien podría ser empleado en otro ambiente como una herramienta en los centros de adiestramiento para fomentar la rápida y segura respuesta de los grupos operativos a bordo de las unidades al momento de la operación de los equipos.

Apéndice I

Coefficientes de las curvas de aproximación para potencia, velocidad, cremallera y temperatura de gases de escape

- Potencia (KW) en función de las RPM

Ref. figura 1 - Curva tipo: $N_e \text{ (KW)} = K_i * (\text{RPM} / 100)^3$

Condición	Valor de K_i
1	54.60
2	80.70
3	131.0
4	276.5
5	179.6

- Velocidad (KNT) en función de las RPM

Ref. figura 2 - Curva tipo: $V_s = (\text{RPM} / 100) * (A_i * (\text{RPM} / 100) + B_i)$

Condición	Valor de A_i	Valor de B_i
1	-2.368001E-1	6.02839800
2	3.749910E-1	3.49172300
3	3.353180E-1	3.09490090
4	8.4308289E-1	0.37407608
5	4.8483826E-1	2.39208964

- Apertura de cremallera (mm) en función de las RPM

Ref. figura 3 - Son dos rectas para cada condición: $C_r = M_i * \text{RPM} + B_i$

Cada recta comienza en 100 RPM y quiebra en un valor específico para la condición

Condición	Recta	Rango de las RPM	M	B
1	1	100-330	0.053927400	-1.7060475
1	2	330-570 (con sobrec.)	0.109331100	-19.8463214
2	1	100-280	0.058394140	0.0
2	2	280-460 (con sobrec.)	0.143835560	-23.4109589
3	1	100-220	0.076190378	0.0
3	2	220-360 (con sobrec.)	0.174999921	-20.75
4	1	100-180	0.088888650	-0.08887031
4	2	180-250 (con sobrec.)	0.384072430	-53.1700937
5	1	100-200	0.086539690	-0.18155167
5	2	200-310 (con sobrec.)	0.216494704	-24.701025

- Temperatura de gases de escape

La expresión es: $T (^{\circ}\text{C}) = \beta * \text{RPM} + C_i$

Donde: $\beta =$ 0.25 si la cremallera $\leq 100\%$ (≤ 37 mm)

2.0 si la cremallera $> 100\%$ (> 37 mm)

C_i es una constante que depende de la i-ésima condición y cuyos valores se muestran a continuación:

Condición	Valor de C_i	
	Cremallera ≤ 37 mm	Cremallera > 37 mm
1	320.0	-590.0
2	342.0	-410.0
3	366.0	-210.0
4	392.5	-10.00
5	377.0	-120.0

Apéndice II

1. Palanca de control de RPM

La presencia o no de la palanca es sensada cuando el módulo arranca. Si la misma no está conectada, puede operarse el control de las RPM con el mouse, en ambos ejes simultáneamente o por separado.

2. Detalles del arranque

El instructor puede indicar que el arranque fallará. En ese caso, la simulación ejecutará durante unos 20 segundos a 70 RPM para indicar que los ejes no entran en régimen de arranque y se detendrá. El instructor deberá comenzar el proceso nuevamente.

El programa de simulación debe determinar si se arranca con un eje con dos. Cuando la diferencia entre los valores de RPM entre uno y otro es igual o mayor que 50, arranca con un solo eje.

Los tiempos de arranque son: de 0 a 70 RPM en 5 segundos; de 70 a 100 en 10 segundos. Cuando arranca, la cremallera da un brusco salto hasta 40% y luego baja.

Cuando se propulsa con dos ejes, el velocímetro muestra un valor que resulta de promediar las lecturas. Esto constituye una solución de compromiso hasta hallar otra más estudiada.

3. Temperatura de gases de escape y del agua. Presión de aceite.

La temperatura de gases inicia en 25° y llega a 345° en 15 segundos. Se asume Condición 1.

La temperatura del agua enfriada inicia en 40° y llega a 70° en 180 segundos.

La presión de aceite se mantiene en 6.5 bar hasta las 280 RPM.

4. Cambio de condición de navegación.

Cuando se transiciona a una condición **MÁS FAVORABLE**, hay un brusco aumento de las RPM (15%) que se van reduciendo hasta llegar al valor original (en 7 segundos) mientras **AUMENTA** la velocidad y **DISMINUYE** la cremallera. En resumen, en ese tiempo se llega a la situación de equilibrio (**PROPULSANDO**).

Cuando se transiciona a una condición **MENOS FAVORABLE**, se produce una caída brusca de las RPM del 10%, que se trata de recuperar en 15 segundos, pero si en la condición pedida no se llega a las RPM ordenadas, se reducen las mismas de acuerdo con el valor de cremallera.