



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Felipe Enrique Serey Mendoza

Reducción de Puntas de Consumo en Sistemas de Levante

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 09 de agosto de 2017



Reducción de Puntas de Consumo en Sistemas de Levante

Felipe Enrique Serey Mendoza

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Jorge Luis Medina Hanke
Profesor Guía

Sr. Gonzalo Alberto Farías Castro
Segundo Revisor

Valparaíso, 09 de agosto de 2017

*A mi abuelo Pedro Segundo Mendoza por su motivación
para lograr esta meta y continuar los estudios de
Ingeniería Civil Eléctrica.*

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi padre, madre y hermana por aquellas conversaciones previas a tomar la decisión de continuar estudiando para obtener el título de Ingeniero Civil Eléctrico ya que sin su apoyo no hubiera sido posible llegar a este momento.

Además debo agradecer a Fernanda por su apoyo y compañía incondicional durante todo este tiempo, por soportar mi falta de tiempo, mala memoria y malos ratos. Además a mi amigo Dieter por estar siempre presente tanto en lo personal como en lo laboral.

Valparaíso, 9 de agosto de 2017

Felipe Serey.

Resumen

Se presenta a continuación el proyecto “Reducción de puntas de consumo en sistemas de levante”. Este proyecto tiene por finalidad buscar una solución utilizando un modelo de operación para controlar múltiples grúas las cuales se encuentran dentro del San Antonio Terminal Internacional o también conocido como STI para evitar que se active la protección de sobrecorriente del alimentador de media tensión.

Los principales equipos que poseen la mayor demanda energética son contenedores refrigerados o reefer junto con las grúas ship to shore también conocidas como STS por lo que el análisis se enfatiza en esos dos equipos. El modelo diseñado tiene la capacidad de detectar la corriente en el alimentador y realiza el bloqueo o activación de las grúas dependiendo de los niveles de corriente de entrada.

Los resultados obtenidos son según lo presupuestado, ya que se consigue reducir y significativamente la energía consumida durante los transitorios de corriente producidos por las grúas.

Palabras claves: control directo del torque, grúas, algoritmo de control, STS, terminal STI, transitorios de corriente, Matlab, Simulink.

Abstract

The project "Reduction of consumption peaks in lifting systems" is presented below. This project aims to find a solution using an operation model to control multiple cranes which are located in the San Antonio International Terminal also known as STI to prevent the overcurrent protection activation at the medium voltage feeder.

The main equipment that has the highest energy demand are refrigerated containers or reefer with ship to shore cranes also known as STS, so it is emphasized in these two equipment's. The designed model has the ability to measure the current in the feeder and performs the blocking or activation of the cranes depending on the input current levels.

The results obtained are as budgeted as it is possible to significantly reduce the energy consumed during the current transients produced by the cranes.

Key words: direct torque control, crane, control algorithm, STS, STI terminal, current transient, Matlab, Simulink.

Índice general

Introducción	1
Objetivos generales	3
1 Descripción de terminales portuarios	4
1.1 Descripción del puerto de San Antonio	4
1.1.1 Terminal STI	5
1.1.2 Terminal puerto central	6
1.1.3 Terminal Puerto Panul	6
1.2 Especificaciones técnicas generales de equipos involucrados	6
1.2.1 Grúas STS	6
1.2.2 Contenedores refrigerados o reefer	8
1.3 Tipos de maquinarias utilizadas	10
1.3.1 Grúas de Terminal STI	10
1.3.2 Grúas de Puerto Central	11
2 Antecedentes del proyecto	12
2.1 Antecedentes de la sobrecarga	12
2.2 Especificaciones grúas STS	13
2.2.1 Esquema de los principales motores de la grúa.	13
2.3 Problema específico a resolver	15
2.4 Conclusiones del problema	15
3 Especificaciones del proyecto	17
3.1 Problemática	17
3.2 Beneficiarios	17
3.3 Objetivos	17
3.3.1 Objetivos de diseño	18
3.4 Alcances del proyecto	18
4 Diseño preliminar	19
4.1 Descripción	19
4.2 Escenarios de operación	19
4.3 Simulaciones preliminares	20

4.3.1 Partida simultánea.....	20
4.3.2 Partida desfasada	22
4.4 Modo de operación	22
4.4.1 Procesos del algoritmo	22
4.4.2 Objetivos de diseño.....	23
4.5 Primera etapa de simulación.....	24
4.5.1 Consideraciones.....	25
4.5.2 Componentes de la simulación.....	25
4.6 Resultados de la simulación	29
4.6.1 Simulación con corriente bajo nivel de seguridad	29
4.6.2 Simulación de partida simultánea con corriente sobre valor de seguridad.....	31
4.6.3 Simulación con partida desfasada inversa.....	31
4.7 Conclusiones del capítulo.....	32
5 Desarrollo de modelo completo	34
5.1 Esquema de Simulink.....	34
5.2 Código en fichero .m	35
5.3 Resultados de simulación	38
5.4 Conclusiones del capítulo.....	41
6 Resultados finales	42
6.1 Simulación original	42
6.2 Simulación utilizando el modelo de operación	45
6.3 Conclusiones del capítulo.....	48
Discusión y conclusiones.....	49
Bibliografía.....	52
A Esquemático grúa STS	53
B Control directo del torque	55
B.1 Introducción.	55
B.2 Principio de operación.	55

Introducción

El puerto de San Antonio se ha transformado en el principal puerto de nuestro país y de la región, debido a la cercanía con la Capital, Santiago de Chile, poseer una mayor capacidad y diversidad de carga comparada con el histórico puerto de Valparaíso. El puerto de San Antonio cuenta con cuatro terminales de carga entre los que destacan el San Antonio Terminal internacional, Terminal Puerto Central, Puerto Panul y Sitio 9 los cuales tienen la capacidad de recibir y embarcar una gran variedad de cargas del tipo granel las cuales incluyen cobre, molibdeno, ácido sulfúrico, Lubricantes, aceites vegetales, solventes, fertilizantes, etc. Se destaca que la división El Teniente de Codelco almacena ácido sulfúrico en el puerto y es almacenado en estanques para su posterior traslado principalmente a puertos en el norte del país y así utilizarlo en procesos mineros.

Lamentablemente durante la época de verano, principalmente entre los meses de noviembre a marzo y por coincidencia con la temporada de exportación de fruta, en el terminal portuario STI se produce un accionamiento de la protección 52-G en el alimentador de la red eléctrica del recinto por sobrecorriente. Se tiene como antecedente que al momento de producirse la mencionada falla, en el puerto existe un gran número de contenedores frigoríficos (reefer) conectados a la red, los cuales se encuentran cargados principalmente con fruta de exportación y son almacenados mientras se espera el arribo del buque que los lleve a su destino final. Además este accionamiento de la protección coincide con la operación de levante de contenedores o en vacío por parte de seis grúas tipo STS que se encuentran en maniobra de carga o descarga de los navíos que atracan en el puerto junto con otras grúas de menor envergadura que realizan maniobras de carga en el muelle.

En el presente proyecto, titulado “Reducción de puntas de consumo para sistemas de levante”, tiene como objetivo el diseñar un sistema de control para el accionamiento de múltiples grúas con la finalidad de reducir el consumo total de estos equipos y reducir la probabilidad de activar las protecciones de sobrecorriente del alimentador. Este proyecto se realizó en dos semestres como tema para los ramos de seminario de proyecto EIE-640 y proyecto de título EIE-650 respectivamente, en el primer ramo se realizó el estudio y análisis energético de la falla para posteriormente, durante el segundo semestre, desarrollar el diseño y simulación del modelo de operación que da solución a la problemática que acontece en el mencionado terminal portuario.

Cómo antecedente principal para este proyecto se utilizó un documento realizado en la Escuela ejecutado por el Alumno Alfredo Thompson en donde se comprobó la causa de la falla. En este resultado se ve que el mayor consumo de energía ocurría en las grúas STS y durante la operación de levante en vacío realizada por los motores principales de esta máquina debido a la aceleración generada durante la partida y debido a que las máquinas se llevan por sobre la velocidad nominal. Frente a esta solución se dieron algunas soluciones al problema entre las cuales se encuentran aumentar la potencia del alimentador realizando obras mayores de ingeniería y aumentando el costo por energía eléctrica o reemplazar los equipos con DTC por algunos con control vectorial que tengan limitadores de corriente.

Si bien los equipos presentes en las grúas STS del terminal STI no poseen limitadores de corriente se podría modificar la programación limitando las velocidades máximas de operación de los motores principales, pero esto resultaría contraproducente debido a que se reduciría el desempeño de las grúas incrementando los costos por mayores demoras en faenas de descarga de buques y se perjudicaría a los operadores de las máquinas debido a que ellos reciben bonos por producción por lo que utilizan las máquinas a todo su desempeño.

Una tercera opción es la alternativa que da origen a este proyecto y tiene relación con diseñar un modelo que permita bloquear o activar la señal que acciona los motores principales cuando se requiera realizar una faena de levante tanto con carga como en vacío para poder reducir el accionamiento de la protección 52-G que existe en el alimentador de media tensión. Se debe destacar que para esta alternativa no se requiere de mayores modificaciones al sistema ni realizar modificaciones en la infraestructura existente, principalmente se deberá escoger un equipo adecuado y compatible con los actuales equipos de control de las grúas STS e instalar un equipo de medición para registrar las corrientes del alimentador. Además no se modifica el funcionamiento ni rendimiento de las máquinas ya que sólo habrán retardos en la operación cuando se sobrepasen los márgenes de corriente establecidos por el usuario pudiendo ser de hasta 4 segundos cuando se produzca la situación crítica que por lo demás es de una muy baja probabilidad de ocurrencia, pero por cada vez que ocurre se estima que se produce un apagón total de las instalaciones incluidas oficinas, luminarias y por supuesto las grúas ya mencionadas.

Para poder delimitar la extensión del proyecto, se establece que los resultados que se esperan obtener al finalizar son diseñar algoritmo de control para optimizar la operación de un sistema multigrúa de manera de reducir las puntas de consumo, realizar simulación en software Matlab Simulink verificando que se cumpla el algoritmo de control diseñado y verificar la factibilidad de implementar en otros lenguajes de programación para su implementación real.

En los primeros capítulos de este informe se realiza una descripción general del terminal portuario STI junto con analizar la situación que acontece en este lugar. También se describen los principales equipos que se encuentran conectados a la red como son los reefer, grúas STS y grúas pórtico sobre neumáticos o también conocidas por sus siglas en inglés como RTG (Rubber Tire Gantry). Además se presentan resultados de simulaciones realizadas en Matlab, las cuales respaldan este proyecto y en las cuales se puede apreciar el ciclo de demanda energético y que los antecedentes concuerdan con las simulaciones previas realizadas. Dentro de estas simulaciones

preliminares se puede observar que al realizar un desfase de cuatro segundos entre partida de las grúas en operación de levante de carga en vacío, se reduce significativamente el consumo de corriente en el alimentador con lo cual se respalda la utilidad de diseñar un modelo de operación para evitar el consumo simultaneo de las grúas cuando sea necesario.

Durante el desarrollo de este proyecto fueron surgiendo algunas dudas o cuestionamientos que fueron necesarios aclarar y definir. Principalmente se debe dejar en claro que este proyecto no busca automatizar la operación de un conjunto de grúas si no que debe tener la capacidad de habilitar o bloquear la señal de accionamiento proveniente de cada grúa y que depende sólo del operador dar inicio o término a la mencionada señal. Se destaca este punto en particular ya que si bien puede parecer lógico resulta significativo en la metodología o forma en la que se aborda el problema a solucionar.

Las simulaciones y el modelo como tal se desarrolla en el entorno de Matlab y su aplicación Simulink. Se incluyen circuitos de control simulados y diagramas explicativos para demostrar el funcionamiento del algoritmo tanto en su versión preliminar y final. En primera instancia se trata de utilizar solamente el entorno de Simulink utilizando en su totalidad bloques para poder presentar el modelo logrando realizar el secuenciado de las máquinas pero sin almacenamiento de las variables como modelo FIFO (first in first out). Finalmente se optó por desarrollar el modelo utilizando ambos entornos que facilita Matlab desarrollando una parte en código o script en un archivo de extensión .m operando en conjunto con Simulink.

Objetivos generales

- Desarrollar un modelo de operación para un sistema conformado por múltiples grúas con la finalidad de minimizar el consumo simultáneo de los equipos en funcionamiento.
- Verificar y demostrar la funcionalidad del modelo de control diseñado.

1 Descripción de terminales portuarios

Para poder comprender de mejor manera el conjunto en donde surge la necesidad de realizar este proyecto se debe comprender la estructura y ubicación del terminal portuario STI. En el presente capítulo se muestra información respecto a los principales consumos de energía eléctrica y descripciones del puerto de San Antonio.

1.1 Descripción del puerto de San Antonio.

Puerto San Antonio es el principal puerto de Chile, ubicado en la zona central, siendo el puerto más cercano a Santiago, la capital del país. Las mercancías que este recibe, están destinadas principalmente a la zona central de Chile y la provincia de Mendoza, Argentina.



Figura 1-1 Distribución de terminales dentro del puerto.

Durante el año 2011 se concesionó la totalidad de la infraestructura de carga general existente en este puerto. Con esto el puerto de San Antonio se dividió en tres terminales de carga y cuya distribución se puede observar en la Figura 1-1 en donde se muestra una imagen aérea con la distribución de los mencionados terminales que conforman el Puerto de San Antonio [1].

En la figura 1-1 se puede ver la distribución de los distintos terminales que se ubican dentro del puerto, dentro de los cuales, con color amarillo se encuentra STI, lugar en donde se presenta la activación de la protección 52-G.

Este puerto tiene la capacidad de recibir y embarcar una gran variedad de cargas del tipo granel las cuales incluyen cobre, molibdeno, ácido sulfúrico, Lubricantes, aceites vegetales, solventes, fertilizantes, etc. Se destaca que el ácido sulfúrico llega al puerto desde la división El Teniente de Codelco, donde es almacenado en estanques con una capacidad total de 21.600 [m³] o 40.000 toneladas.

Para este proyecto, se profundizara especialmente en la carga contenedorizada ya que es la que estarían movilizand las grúas al momento de ocasionada la falla. En la Tabla 1-1 se muestran las estadísticas correspondientes al periodo 2015-2016, las cuales se extrajeron de la página web del puerto de San Antonio y se encuentran actualizadas al momento de realizar este informe.

Tabla 1-1 Estadísticas de carga contenedorizada 2015-2016

Meses	TONELADAS		
	2015	2016	% VARIACION
ENERO	848.560	991.325	16,8%
FEBRERO	899.352	982.614	9,3%
MARZO	1.145.765	1.239.569	8,2%
ABRIL	922.897	1.181.113	28,0%
MAYO	1.056.687	1.121.978	6,2%
JUNIO	920.217	1.081.114	17,5%
JULIO	994.775	1.094.358	10,0%
AGOSTO	1.002.698	1.597.535	59,3%
SEPTIEMBRE	966.361	1.225.435	26,8%
OCTUBRE	1.063.529	1.779.299	67,3%
NOVIEMBRE	974.751	1.400.260	43,7%
DICIEMBRE	928.437	1.513.581	63,0%
Total anual	11.724.029	15.208.181	29,7%

De la Tabla 1-1 se puede observar que este puerto en el año 2015 han movilizad cerca de 12 millones de toneladas y en el 2016 unas 15 millones de toneladas, logrando un incremento anual cercano al 30%. Considerando que un contenedor promedio lleva 25 toneladas, se estima que dentro del puerto se procesan cerca de 53 contenedores por hora en promedio [2].

1.1.1 Terminal STI

San Antonio Terminal Internacional (STI) es considerado el terminal portuario más moderno y eficiente de Sudamérica y opera la concesión del Frente de Atraque Molo Sur del Puerto de San

Antonio. Cuenta con la mayor cantidad de grúas Gantry (grúas pórtico tipo STS) del país y de toda la costa oeste de Sudamérica. Estos equipos, junto con los altos estándares de calidad que logran en sus operaciones, lo posicionan como el terminal de mayor rendimiento en transferencia de contenedores en esta parte del continente.

Dentro de este terminal además se encuentra el terminal de la empresa Terquim S.A. encargado del almacenaje principalmente de ácido sulfúrico entre otros líquidos.

1.1.2 Terminal puerto central

Puerto Central (PCE) nace luego de que la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA) realiza una concesión del Frente de Atraque Costanera- Espigón del Puerto de San Antonio, la cual se adjudica por 20 años a Puerto de Lirquén S.A. En julio de 2011 Puerto Central S.A se constituyó como Sociedad Anónima con el objeto de construir, desarrollar, mantener, reparar y explotar la concesión adquirida.

1.1.3 Termial Puerto Panul

Terminal Puerto Panul es el mayor operador de graneles sólidos de Puerto San Antonio. Su principal área de negocios es explotar el frente de atraque, donde se prestan los servicios de muellaje, transferencia de carga y otros servicios propios a la actividad portuaria. Su sitio tiene un calado aproximado de 38 pies y las naves graneleras son atendidas por una grúa de brazo nivelado, que puede descargar 700 toneladas por hora.

1.2 Especificaciones técnicas generales de equipos involucrados

Se deben considerar las especificaciones técnicas de las principales maquinarias que pudieran aportar a la falla del sistema. Según los antecedentes que se tienen, la falla se produce principalmente al utilizar las grúas STS del tipo Panamax hasta Super Post-Panamax en levante de carga junto con una gran cantidad de contenedores tipo reefer.

1.2.1 Grúas STS

Llamada así por sus siglas en inglés que hacen referencia a Ship-to-shore (buque a orilla) las cuales son utilizadas para cargar o descargar los contenedores desde barcos atracados a muelle. Para este tipo de grúa existen principalmente tres tipos, los cuales se describen a continuación [3]:

1. Panamax: Grúa llamada así debido al estándar fijado por el canal de Panamá (previo a ampliación), el cual indica que esta grúa puede descargar buques con las dimensiones requeridas para poder atravesar este canal. En la Figura 1-2 se puede observar un esquema de una grúa del tipo Panamax donde se puede apreciar que esta posee una capacidad de descargar hasta 13 contenedores puestos en fila como se muestra en la figura.

2. Post-Panamax: Esta grúa está diseñada para poder descargar buques que no podían atravesar el canal de Panamá previo a su ampliación. Tienen un alcance para filas de entre 16 y 20 contenedores.
3. Super Post-Panamax: Estas son aún más grandes que las anteriores y tienen un alcance máximo de entre 22 y 24 contenedores.

La Figura 1-2 y 1-3 son representativas para los tres modelos anteriormente descritos ya que solamente difieren de las dimensiones, especialmente el alcance del brazo principal.



Figura 1-2 Grúa STS del tipo Panamax.

Dimensiones y características principales:

- Carga útil es generalmente entre 40 y 60 Toneladas.
- La altura de la grúa oscila entre 30 y 60 m.
- La velocidad del carro es del orden de 150 m/min.
- La velocidad de la estructura es del orden de 40 m/min.
- La velocidad en levante con carga es del orden de 80 m/min.
- La potencia de los motores de levante son de unos 350 Kw en promedio.
- La potencia de los motores de traslación son del orden de los 20 a 30 Kw.
- Capacidad de movilizar contenedores de hasta 60 contenedores por hora.

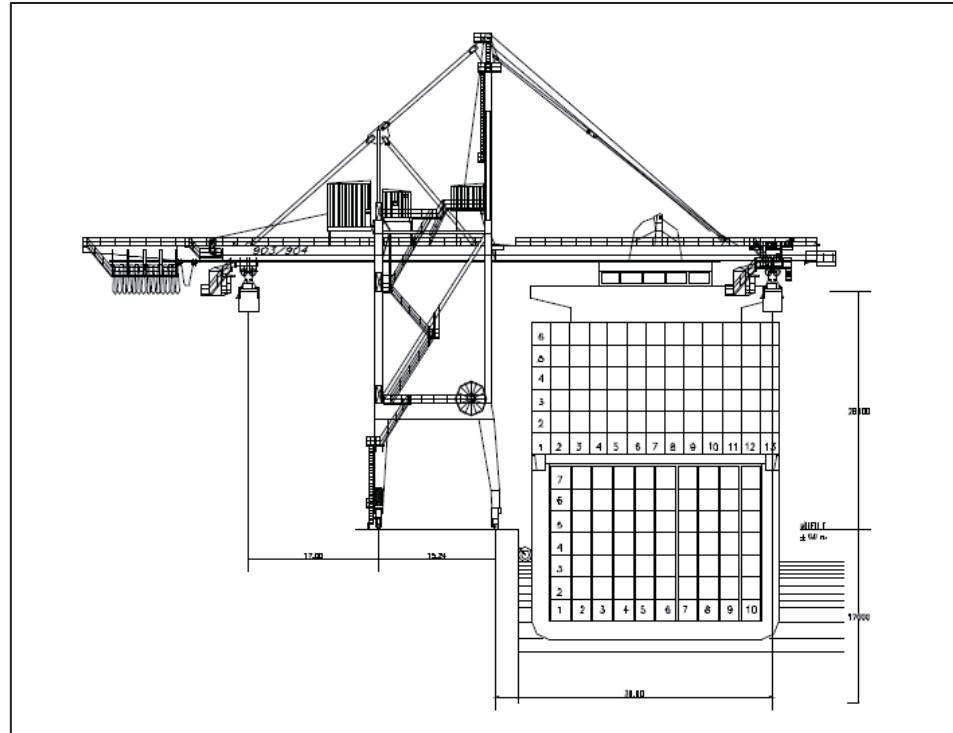


Figura 1-3 Vista lateral de grúa STS tipo Panamax.

1.2.2 Contenedores refrigerados o reefer

Los reefer son utilizados en todo el mundo para poder transportar cargas perecibles como carne, frutas, verduras, lácteos, entre otros. Principalmente el mercado está compuesto por diversas marcas pero las características técnicas son muy similares entre todos. Uno de los fabricantes de mayor prestigio de estos equipos es la empresa ThermoKing (THK) la cual posee actualmente el modelo magnum del cual se detallaran las especificaciones técnicas y se muestra en la Figura 1- 4.



Figura 1-4 Contenedor refrigerado THK.

Descripción de terminales portuarios

Se debe destacar que el puerto de san Antonio tiene una capacidad de almacenamiento superior a las 2.000 unidades de este tipo de equipos, pudiendo estar todos conectados a la red eléctrica del recinto de ser necesario.

En la tabla 1-2 se pueden observar las especificaciones técnicas del motor que opera el compresor de la planta de frío del equipo.

Tabla 1-2 Especificaciones técnicas de compresor reefer THK.

Motor del compresor	
Tipo	460/380V, 60/50 Hz, 3 Phase
Kilowatts	4.48 kW @ 460V, 60 Hz
Caballos d fuerza	6.0 hp @ 460V, 60 Hz
RPM	3550 RPM @ 460V, 60 Hz
Corriente de rotor bloqueado	70 amps @ 460V, 60 Hz

Además, en la Tabla 1-3 se detallan las especificaciones del motor del ventilador para la ventilación de la cámara frigorífica.

Tabla 1-3 Especificaciones del motor del ventilador de reefer THK

Motor del ventilador	
Tipo	460/380V, 60/50 Hz, 3 Phase
Kilowatts	0.55 kW @ 460V, 60 Hz
Caballos de fuerza	0.75 hp @ 460V, 60 Hz
RPM	1725 RPM @ 460V, 60 Hz
Corriente a plena carga	1.0 amps @ 460V, 60 Hz; 1.0 amps @ 380V, 50 Hz

De las tablas anteriores y considerando la cantidad de equipos que pueden estar conectados a la red eléctrica, se puede observar que pueden representar parte importante del consumo total del puerto durante periodos de embarque de fruta.

Finalmente para el desarrollo de este proyecto se debe tener en cuenta que el funcionamiento de estos equipos no es constante ya que tienen sistemas de control diseñados para mantener la

temperatura dentro de un rango constante, lo cual va a depender del contenido que este contenga.

1.3 Tipos de maquinarias utilizadas

En cada terminal de carga se utilizan diversos tipos de maquinarias como grúas, cargadores, horquillas, entre otros. Para este trabajo de título se requiere especificar las características técnicas de los sistemas de levantes accionados por energía eléctrica los cuales se detallan en los puntos siguientes. Se sabe además que en el caso de San Antonio las grúas son accionadas utilizando variadores de frecuencia con motores de inducción.

1.3.1 Grúas de Terminal STI

STI cuenta con los siguientes equipos que se muestran en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4 Maquinaria eléctrica presente en STI

Tipo	Cantidad
Grúas STS Super Post-Panamax	2 (hasta 22 filas)
Grúas STS Post-Panamax	4 (hasta 19 filas)
Grúas STS Panamax	2 (hasta 13 filas)
Grúas de patio (RTG)	6

En la Figura 1-5 se muestran las grúas STS pertenecientes al terminal portuario STI.



Figura 1-5 Grúas STS de STI.

La grúa RTG (rubber tyred gantry) o también conocida como grúa pórtico sobre neumáticos, es de menor tamaño en comparación con las tipo STS Panamax y derivadas, y son utilizadas para

cargar camiones con contenedores almacenados en puerto. Este tipo de grúa se muestra en la Figura 1-6.

1.3.2 Grúas de Puerto Central

En la actualidad Puerto Central cuenta principalmente con 4 grúas del tipo Super Post-Panamax junto con 8 grúas tipo RTG. Estas últimas se pueden observar en la Figura 1-4.



Figura 1-6 Grúa pórtico RTG

2 Antecedentes del proyecto

Este proyecto surge de la necesidad de resolver un problema que se produce en el puerto de San Antonio en la época de verano, debido principalmente a la conexión a la red de una gran cantidad de contenedores refrigerados, también conocidos como reefer, en conjunto con las grúas que realizan la carga y descarga de contenedores. La falla se presenta sólo cuando operan las grúas de manera simultánea realizando maniobras de levante ya sea en vacío o con contenedores, lo cual ocasiona que operen las protecciones del alimentador del terminal portuario STI produciendo un apagón general y detención de todas las operaciones del mencionado terminal.

Se debe destacar que los principales elementos de la grúa y los que generan el mayor consumo corresponden a los dos motores hoist o de levante, accionados cada uno por variadores de frecuencia regenerativos en configuración maestro–esclavo. Del mismo modo, los motores de desplazamiento del carro y levante de la pluma, son accionados por variadores de frecuencia pero estos últimos no fueron confirmados en reunión si eran regenerativos, sin embargo no son relevantes para el presente estudio.

2.1 Antecedentes de la sobrecarga.

De acuerdo a la información entregada por STI, se sabe que al momento de la falla se encontraban en operación los siguientes equipos:

- 6 Grúas STS (4 grúas arrancando con carga y 2 arrancando en vacío).
- 3 Grúas RTG.
- 1616 Reefers, con un consumo promedio de 4 [Kw] cada uno.

Además, los operarios de la planta entregaron información respecto a la operación del interruptor general, el cual registro una corriente de 550 [A], lo cual provocó el accionamiento del interruptor luego de 4.5 [s] y la corriente mínima del accionamiento de la protección es de 408 [A].

En la figura 2-1 se muestran las curvas de las protecciones del alimentador del terminal STI. En esta se puede observar de color verde la curva correspondiente a la protección de corriente 52-G y con color rojo la perteneciente al reconectador. Además se puede observar que coinciden los tiempos de desconexión y los niveles de corriente detectados.

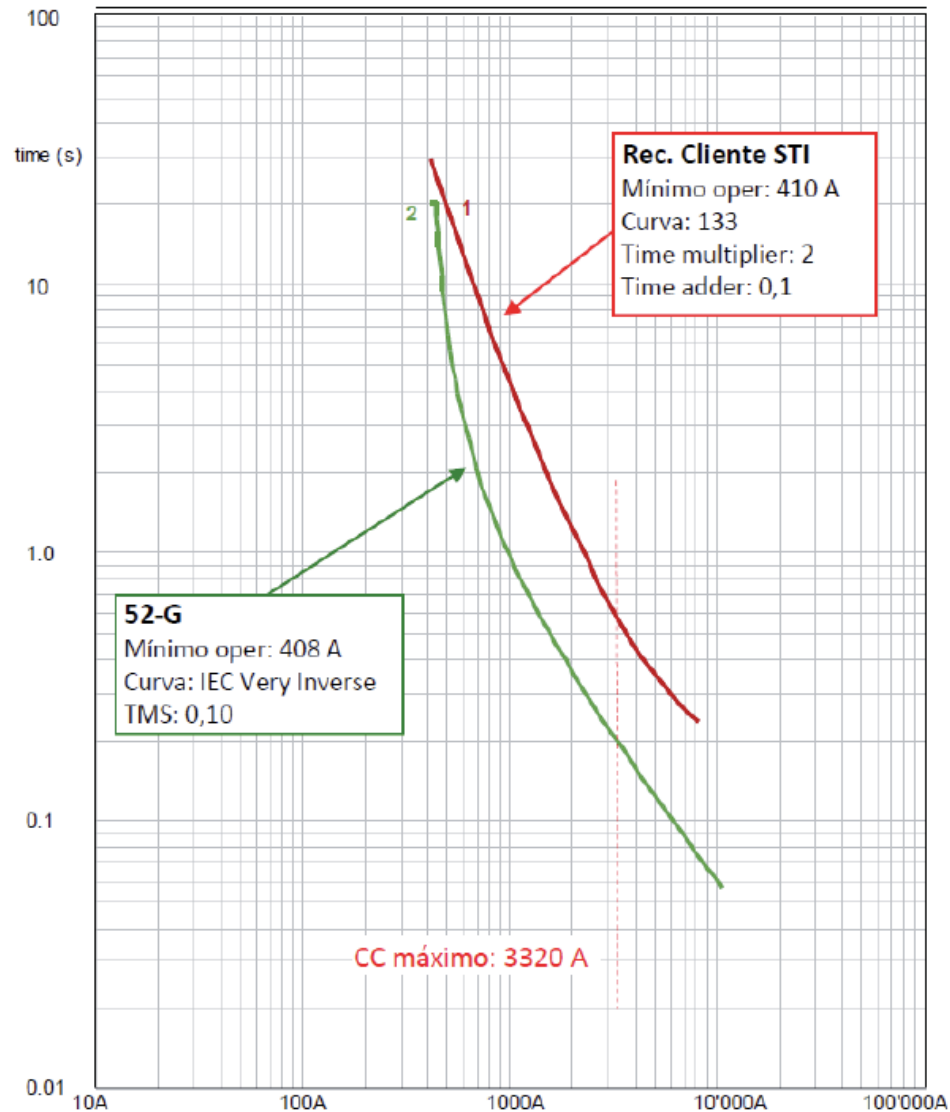


Figura 2-1 Ajustes actuales reconector y 52-G STI.

2.2 Especificaciones grúas STS.

Como las grúas de este tipo son las que poseen motores de mayor envergadura dentro de STI, se deben detallar y destacar algunas características de estas ya que son las que tienen mayores consumos de corriente.

2.2.1 Esquema de los principales motores de la grúa.

Para poder comprender de mejor manera los componentes de una grúa STS, se puede observar en la figura 2-2, de color azul se muestra la cuerda principal de la grúa, la cual está conectada al spreader y es la que se encarga de realizar la elevación o descenso de los contenedores entre los buques y el muelle. Además esta se encuentra conectada a los dos motores principales de la grúa. De color rojo se puede ver el boom hoist o elevador de grúa, el cual se utiliza para izar la pluma

de la grúa en caso de que se requiera. Finalmente con color verde se aprecia la cuerda del carro o “trolley rope”, la cual se encarga de desplazar este horizontalmente.

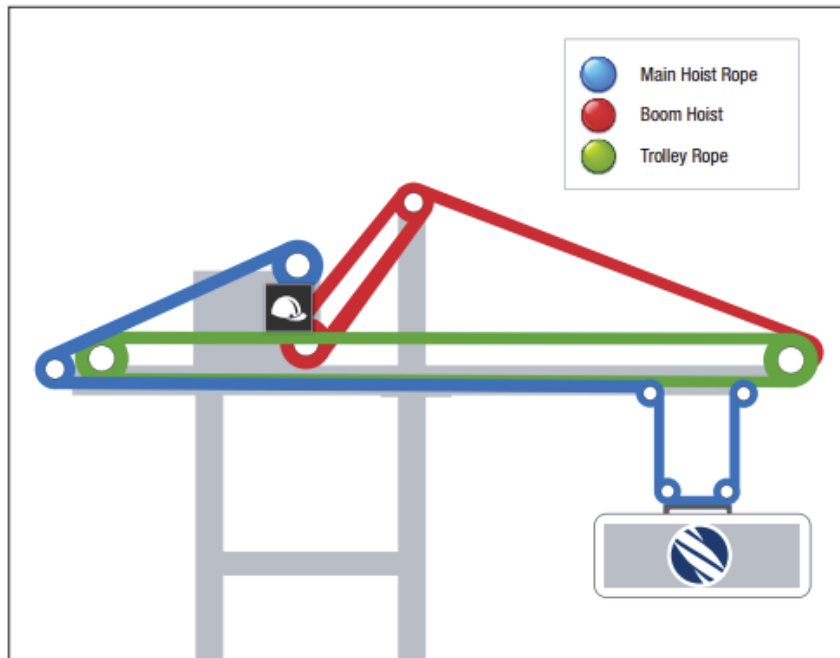


Figura 2-2 Esquema de una grúa STS.

En la figura 2-3 se muestra un spreader de una grúa STS, el cual es el encargado de sujetar la carga durante el proceso de carga y descarga de las embarcaciones mercantes. Además se sabe que la grúa tiene una velocidad de levante con una carga de 60 toneladas de 90 [m/s] y cuando realiza el izaje o descenso en vacío (sin contenedor), esta alcanza una velocidad de 180 [m/s].



Figura 2-3 Spreader de una grúa STS.

2.3 Problema específico a resolver

Debido al nivel de aceleración que es sometido el motor durante el arranque en vacío, los niveles de corriente superan a la condición bajo carga. De acuerdo al informe desarrollado en la EIE sobre este suceso, se realizaron simulaciones de una grúa, obteniendo valores de unos 2000 [A] al mover el spreader en vacío, contra 500 [A] con una carga de 65 [Ton], todo esto referido a 500 [V]. Esto se explica considerando que el momento de inercia impuesto por el spreader es menor al impuesto por un contenedor, sin embargo, su aceleración va a ser mucho mayor, por lo tanto, el producto de la aceleración y el momento de inercia generan un torque tal que los niveles de corriente superan al escenario con carga.

Del mismo modo se realizaron simulaciones para el sistema completo según las consideraciones ya entregadas. En este caso se obtuvieron valores de corriente que sobrepasaron los de 550[A] para un nivel de tensión de 12 [kV]. En la figura 2-4 se muestra la curva obtenida mediante simulación con la referencia de los 408 [A] el cual es el valor mínimo de operación de la protección de sobrecorriente 52-G. Se debe destacar que en la mencionada simulación se realizó la partida simultánea de todas las grúas.

La operación del interruptor 52-G se debe principalmente al trabajo sincronizado de las grúas junto con la sobre exigencias a la que son sometidos los motores durante los arranques en vacío provocando niveles de corriente por sobre lo estipulado. Los motores son sobre exigidos en un 250%, generando velocidades por sobre lo nominal, demandando en vacío, corrientes excesivas con respecto a lo estipulado por las especificaciones técnicas de los equipos.

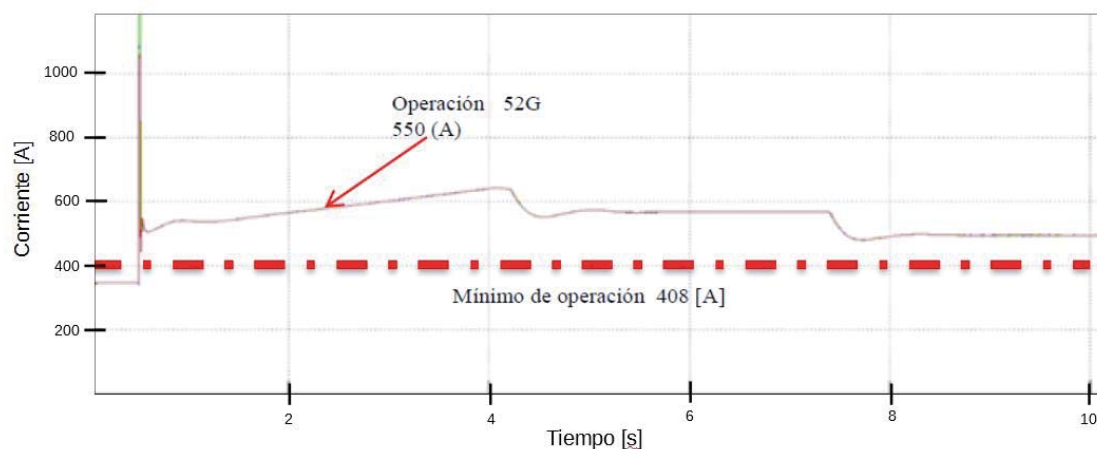


Figura 2-4 Corriente efectiva en el interruptor 52-G.

2.4 Conclusiones del problema.

Luego de recopilar la información y estudiar a fondo el informe entregado a STI, se puede concluir lo siguiente:

1. El interruptor 52-G actuó en los tiempos de acuerdo a la curva de protección a lo cual está ajustado, esto debido a una condición de sobrecarga en el interruptor que superó la corriente mínima de operación y que es posible observar desde las simulaciones realizadas.
2. La máxima demanda y requerimiento de corriente de las grúas STS se origina cuando hay levantamiento del spreader sin contenedor (dirección barco-muelle o viceversa). Esto se explica, considerando que si bien el momento de inercia impuesto por el spreader en vacío es menor al impuesto con un contenedor como carga, los motores son exigidos en un 250% generando velocidades por sobre la nominal, por lo tanto, el producto de la aceleración y el momento de inercia generan un torque tal que los niveles de corriente superan al escenario con carga. También se debe considerar el hecho de que el control directo de torque (DTC) no incluye limitador o controlador de corriente, como sí lo incluye su competencia, el control vectorial.

3 Especificaciones del proyecto

3.1 Problemática

El problema que se ha detectado produce la activación de las protecciones de sobrecorriente del alimentador general del terminal portuario STI, razón por la cual se genera un apagón total de las instalaciones. Esta falla provoca un retraso en el normal funcionamiento de por lo menos 15 minutos, tiempo que tarde en reestablecer el servicio y poner en marcha los equipos.

Esta falla coincide con la temporada de exportación de fruta y de verano, presentándose de manera esporádica. Además coincide con el levante simultáneo de contenedores utilizando grúas STS.

3.2 Beneficiarios

Con este proyecto resultaría beneficiado el terminal portuario STI, debido a que esta falla les afecta directamente a su economía y prestigio. Lo primero debido al costo que significa tener detenidas sus grúas lo cual afecta directamente a su imagen, principalmente por demorar sus servicios y pudiendo incumplir con plazos o frecuencias previamente estipuladas. Además de manera directa se beneficiarían los operadores de las grúas que no tendrían inconvenientes al detener las maniobras de carga y descarga de contenedores junto con trabajadores de oficinas a los cuales se les interrumpe su trabajo cada vez que ocurre un corte del suministro eléctrico.

3.3 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un modelo de operación para un sistema conformado por múltiples grúas con la finalidad de minimizar el consumo simultáneo de los equipos en funcionamiento.

Los objetivos específicos del proyecto son:

1. Estudiar la operación de un sistema de grúas portuarias.
2. Estudiar la estructura energética de maniobras en un ciclo de trabajo del equipo.
3. Estudiar la relación temporal de las maniobras y minimización energética.
4. Modelar las maniobras y evaluar demanda de energía en un ciclo de operación.

5. Compatibilizar diferentes maniobras, optimizando tiempos de operación y demanda de energía.
6. Proponer modalidad de desfase de maniobras, con objeto de reducir puntas de demanda en sistema de suministro y diagrama de flujo de la solución.

3.3.1 Objetivos de diseño

Para poder realizar este proyecto en una primera instancia se debe realizar un estudio de detalle de los principales equipos que se encuentran conectados a la red eléctrica para poder determinar perfiles de carga y consumos que estos puedan tener. Se profundizará especialmente en los equipos descritos en los capítulos anteriores junto a los sistemas de accionamiento que posean las grúas.

3.4 Alcances del proyecto

Resulta de vital importancia delimitar el proyecto para poder evaluar finalmente que se han logrado los objetivos y lo planificado.

Este proyecto tendrá por finalidad lograr los siguientes objetivos específicos y alcances descritos anteriormente y con lo cual se espera llegar a los siguientes resultados:

- ❖ Diseñar algoritmo de control para optimizar la operación de un sistema multigrúa de manera de reducir las puntas de consumo.
- ❖ Realizar simulación en software Matlab Simulink verificando que se cumpla el algoritmo de control diseñado.
- ❖ Factibilidad de implementar en otros lenguajes de programación para su implementación real.

4 Diseño preliminar

En el presente capítulo se presentan las consideraciones que se deben tener en cuenta para poder formular un algoritmo de control y realizar la simulación del sistema utilizando el software Matlab Simulink. Se presentan simulaciones de las máquinas principales con la finalidad de conocer el ciclo de operación de los motores principales de una grúa STS.

4.1 Descripción

Para poder solucionar el problema que se presenta en el terminal portuario STI, se debe diseñar un algoritmo de control que permita realizar la activación de las grúas de manera secuencial cuando se encuentren en operación de levante y sea necesario con la finalidad de no sobrepasar la corriente de operación del interruptor 52G del alimentador. Este modelo de operación debe tener la capacidad de bloquear el accionamiento simultaneo de las grúas cuando los niveles de corriente del alimentador excedan la corriente máxima que podrá ser adecuada según sea necesario.

4.2 Escenarios de operación

Se realizó un análisis de las posibles combinaciones y alternativas de operación que pudieran ocurrir durante la operación del sistema multigrúa y así poder definir las especificaciones para realizar el algoritmo de secuenciado y posterior simulación del sistema. Se considera como peor caso cuando sólo puede operar una grúa en faena de levante debido al nivel de corriente del alimentador.

Debido a que son 6 grúas, nos encontramos frente a 720 posibles casos o secuencias de operación en el peor de los casos. Además si tomamos en cuenta que existe la posibilidad de que los operarios de las grúas accionen estas de manera simultánea, nos encontramos con cinco posibles escenarios:

- ❖ Partida simultanea de 2 grúas: La cual tiene 15 posibles combinaciones.
- ❖ Partida simultanea de 3 grúas: La cual tiene 20 posibles combinaciones.
- ❖ Partida simultanea de 4 grúas: La cual tiene 15 posibles combinaciones.
- ❖ Partida simultanea de 5 grúas: La cual tiene 6 posibles combinaciones.
- ❖ Partida simultanea de las 6 grúas: La cual tiene sólo una posible combinación.

Considerando lo anterior se puede observar que se tiene un total de 776 combinaciones, pero para poder simplificar se reconocen sólo dos casos de operación:

1. Operación de una grúa inicialmente: En este caso es solo una la que comienza operando pero sumado a esta y en un instante posterior podrían ingresar en funcionamiento otras, por lo que se debe bloquear el accionamiento de las demás durante los 4 segundos que dura el peak de partida. Además se deben almacenar el orden de accionamiento de las grúas que han solicitado su accionamiento para ejecutarlas posteriormente y cumpliendo con el orden de entrada.
2. Operación simultanea de grúas: Para el caso que exista una operación simultánea de una o más grúas, el programa debe tener la capacidad de almacenar la lista de grúas que solicitan el accionamiento de sus motores principales para luego ejecutar la orden de acuerdo a una lista de prioridad previamente establecida. Además se debe almacenar en una lista el orden en que otras grúas soliciten el accionamiento mientras las que se accionaron simultáneamente se encuentran en funcionamiento.

Se debe tener en cuenta que el caso número dos resulta estadísticamente poco probable de que ocurra pero para efectos de diseño siempre se debe considerar el peor caso que pudiera ocurrir.

4.3 Simulaciones preliminares

Para poder desarrollar las simulaciones y analizar el comportamiento de los motores principales de las grúas STS que se encuentran en el terminal STI, se utiliza el software Simulink. Para poder comprobar el funcionamiento de las máquinas y estructura energética de la maniobra se utilizaron cuatro motores de inducción con control directo para simular un sistema análogo con dos grúas, se debe recordar que cada una tiene dos motores principales para levante de carga.

4.3.1 Partida simultánea.

En este punto se presenta el resultado de la simulación realizando partida de dos grúas en vacío y de manera simultánea. En la figura 4-1 se muestra el resultado obtenido, de esta imagen se puede apreciar que la corriente máxima llega cercano a los 100 [A] en el lado de 12[KV]. Se debe recordar que cada grúa STS tiene para levante dos motores de 616 [Kw] que operan en modo maestro-esclavo.

En la figura 4-2 se muestra el circuito simulado, el cual consta de 4 motores con DTC conectados en paralelo los cuales se accionan de manera simultánea a los 0.5 segundos de la simulación. Además se puede observar que la forma de onda de la corriente coincide con la que se obtuvo en el informe desarrollado en nuestra escuela para STI y se muestra en la figura 2-4. Para no inducir a errores, se debe destacar que el impulso de corriente inicial corresponde a la corriente inrush del transformador.

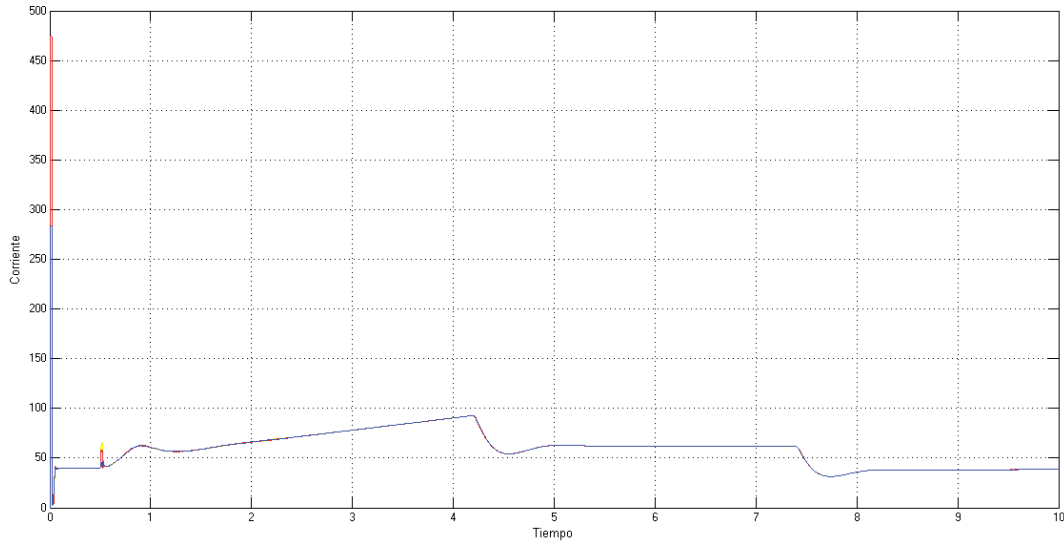


Figura 4-1 Corriente RMS para partida simultánea de dos grúas STS.

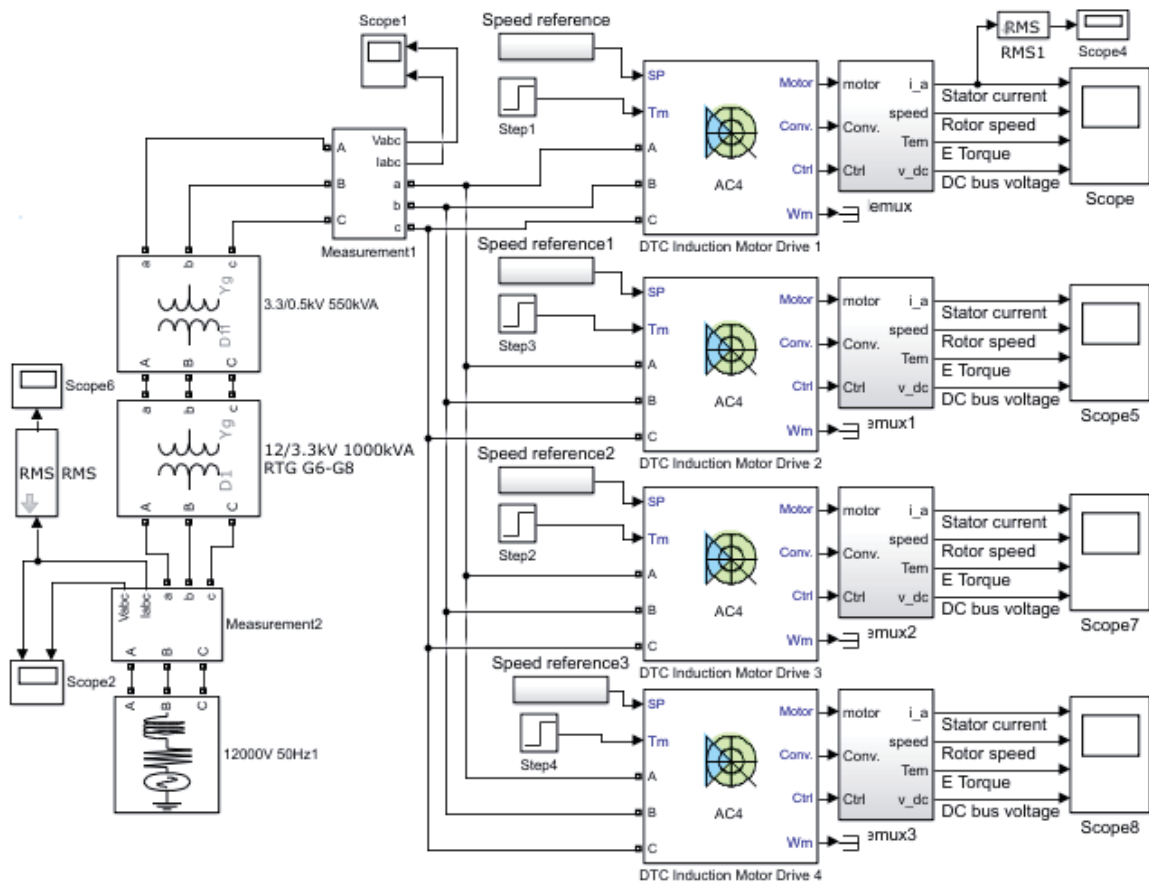


Figura 4-2 Circuito equivalente para dos grúas STS.

4.3.2 Partida desfasada

Para poder comprobar que el desfase en la partida de las grúas en levante es una solución efectiva al problema, se realiza la simulación de dos grúas STS según figura 4-2 mostrada en el punto anterior pero desfasando la partida de la segunda grúa en 4 segundos.

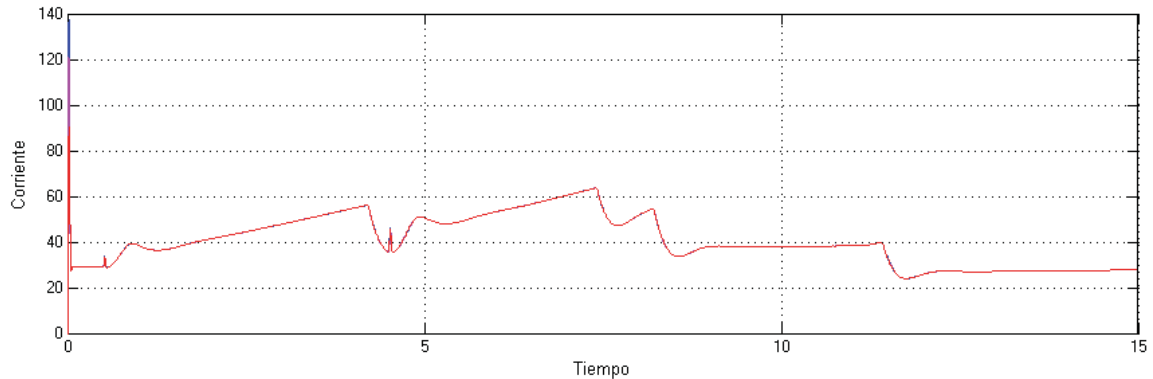


Figura 4-3 Corriente para partida de dos grúas desfasadas.

En la figura 2-3 se muestra la gráfica de la corriente RMS referida a 12 [kV]. En esta se puede apreciar que se presenta una disminución significativa en la corriente máxima que se registra. En este caso el peak de corriente alcanza solamente unos 60 Amperes aproximadamente, con lo cual se puede demostrar que un sistema que impida la partida simultánea de grúas en un sistema mucho más grande, como lo es la red de STI disminuiría significativamente las puntas de corriente en el alimentador con lo cual se evitaría el accionamiento de la protección 52-G.

4.4 Modo de operación

El algoritmo de control a desarrollar debe tener una serie de procesos los cuales permitan abarcar todos los casos posibles descritos con anterioridad y asegurar el correcto desfase de las grúas en caso de que la corriente supere el valor preestablecido.

4.4.1 Procesos del algoritmo

El programa a realizar debe contener los siguientes procesos o etapas:

1. Lectura de corriente del alimentador: Se realiza la medición de la
2. Verificación de corriente: Se debe verificar que el nivel de corriente del alimentador se encuentra bajo el nivel predeterminado, las grúas operan de manera normal y sin ningún tipo de desfase. Por otro lado, si se supera este valor se procede a pasar las grúas a modo secuencial.
3. Modo secuencial: En esta etapa se procede a realizar el bloqueo total de las grúas y el programa es el que se encarga de activar la operación de estas.
4. Accionamiento individual: En el caso de que sólo se accione una grúa, esta operará de manera normal, pero el programa recibirá las posibles solicitudes de accionamiento por parte de los demás operarios de grúa y almacenará la información para poder realizar el accionamiento según los desfases requeridos de las grúas en cola.

5. Accionamiento simultaneo de grúas: Cuando los operarios coincidan en el accionamiento de sus máquinas, el programa entregará la secuencia de accionamiento según una lista de prioridad pre-establecida y además almacenara la información de las máquinas que continúen solicitando accionar mientras las demás grúas se encuentran en ejecución, dejándolas en cola.

En la figura 4-4 se muestra el diagrama de flujos del algoritmo propuesto para dar solución al problema que acontece al terminal de contenedores STI. En este se pueden apreciar los pasos descritos anteriormente y además los escenarios de operación que se describen en el punto 4.2.

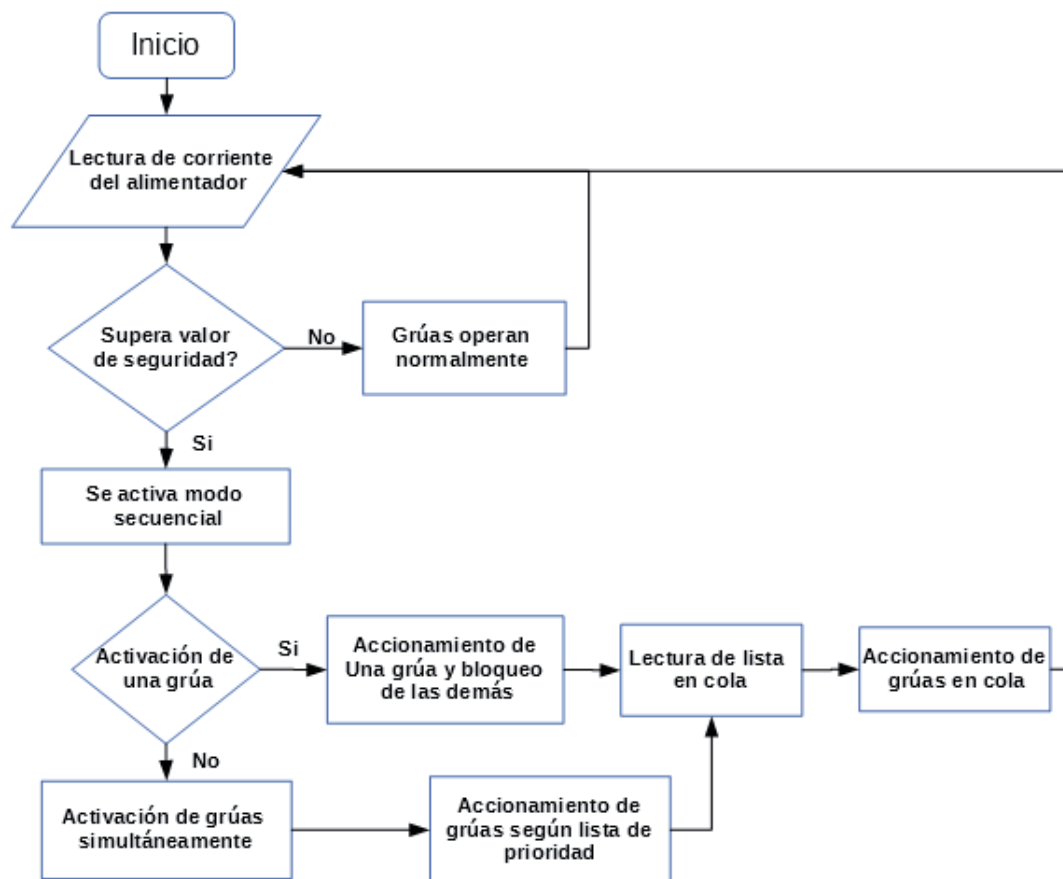


Figura 4-4 Diagrama de flujos del algoritmo.

4.4.2 Objetivos de diseño

Para que el algoritmo cumpla con todas las características descritas este debe cumplir con los siguientes objetivos, los cuales deberán ser la base para realizar las pruebas de la simulación al final de la realización del ramo de proyecto de título.

Estos objetivos son:

- Crear un programa sencillo y funcional, teniendo en consideración que este podría utilizarse en los PLC de control de las grúas utilizando distintos lenguajes de programación.
- Lograr que el sistema realice de manera autónoma los desfases necesarios para no sobrepasar los niveles de corriente impuesto por el alimentador para los diversos posibles casos.
- Verificar funcionalidad para diversos niveles de corriente.

4.5 Primera etapa de simulación

En primer lugar se desarrollaron y observaron distintas configuraciones para poder realizar el desfase del accionamiento de las grúas pero en la primera versión se intentó realizar la simulación utilizando solamente bloques de Simulink lo cual hizo mucho más complejo el desarrollo del modelo de control. En la figura 4-5 se pueden observar los bloques para transformar la señal de corriente en valores RMS, comparadores y un operador lógico “or”. Se realiza la comparación de las tres señales de corriente, ya que para un caso real, estas corrientes podrían no estar balanceadas. Finalmente a la salida del “or” se obtiene una señal de lógica positiva la cual activará el algoritmo de control cuando corresponda.

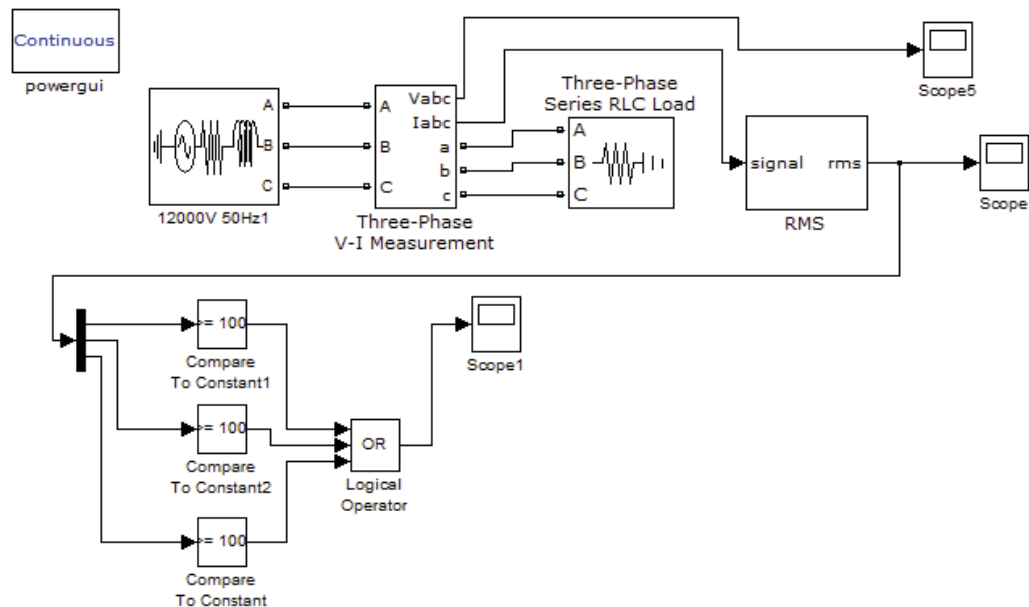


Figura 4-5 Simulación para medir corriente del alimentador.

En esta sección se muestra el avance en el desarrollo del algoritmo de control para un sistema compuesto por seis grúas el cual fue presentado en la segunda mesa redonda del ramo de proyecto de título.

4.5.1 Consideraciones

Se deben tener en cuenta algunas consideraciones o definiciones realizadas para comprender el funcionamiento del sistema de acuerdo a lo presentado con anterioridad junto con aclaraciones que fueron apareciendo mientras se desarrollaba este proyecto y se detallan a continuación:

- De acuerdo a las simulaciones preliminares, se determina que el tiempo adecuado para realizar un retardo de las máquinas es de 4 segundos con la finalidad de evitar los transitorios de corriente y optimizar los tiempos de trabajo de las máquinas.
- La señal de activación de las máquinas se mantiene activa posterior a los 4 segundos ya que el operador debe completar la faena de levante con tiempos superiores a los 10 segundos.
- Se debe tener en cuenta que el algoritmo tiene por finalidad el impedir el accionamiento de los motores de levante por parte del operario de la grúa y no se trata de un sistema de automatización.
- Las simulaciones preliminares se han realizado considerando el peor caso, o sea que no puedan accionar dos grúas de manera simultánea.
- Se define como solicitud de accionamiento a la acción realizada por el operador de la grúa cada vez que requiere realizar faena de levante.
- Se define como permiso de accionamiento a la acción que realiza el algoritmo de control que permite al operador ejecutar la faena de levante.

4.5.2 Componentes de la simulación

En la figura 4-6 se observa el sistema simulado, el cual está compuesto por siete bloques de escalón, los cuales representan a la señal de corriente del alimentador y las señales de accionamiento de cada grúa. Además posee un bloque de subsistema en el cual se encuentra el algoritmo de secuenciado de grúas y finalmente dos osciloscopios para poder observar las señales de entrada y salida.

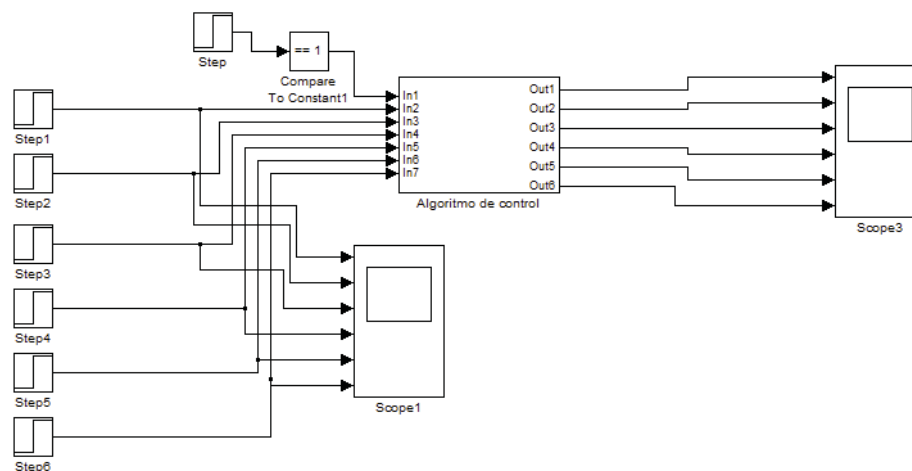


Figura 4-6 Circuito principal de simulación de algoritmo de control.

En la figura 4-7 se pueden ver los componentes principales del algoritmo de control preliminar para secuenciar grúas. Sus principales componentes son:

- Comparador: Este bloque compran el valor de entrada con la constante deseada, en este caso uno, con la finalidad de transformar una variable de tipo doble por una booleana.
- Bloque de suma: Se realiza la suma de las señales de entrada con la finalidad de detectar si hay accionamiento simultáneo.
- Reset de variable: Subsistema, el cual consta de un lazo de control con la finalidad de cambiar el estado de la variable de entrada en el momento que el algoritmo permite el accionamiento a dicha máquina. Esto con la finalidad de borrar la variable del bloque if una vez se ha otorgado el permiso de accionamiento.
- Sub sistema if: Contiene un bloque if y sub sistemas correspondientes para realizar la comparación de variables y permitir secuenciado de las grúas.
- Operador lógico or: Permite el accionamiento de las variables de entrada mediante tres posibles entradas provenientes del bloque if.
- Bloque de delay: Para este caso este bloque no tiene un delay designado, sólo opera como un relay ya que permite el paso de la señal de entrada luego de recibir una señal de nivel lógico alto en la entrada de enable.
- Subsistema de Delay: Entrega una señal lógica de nivel alto durante los cuatro segundos que se debe realizar el retardo del accionamiento.

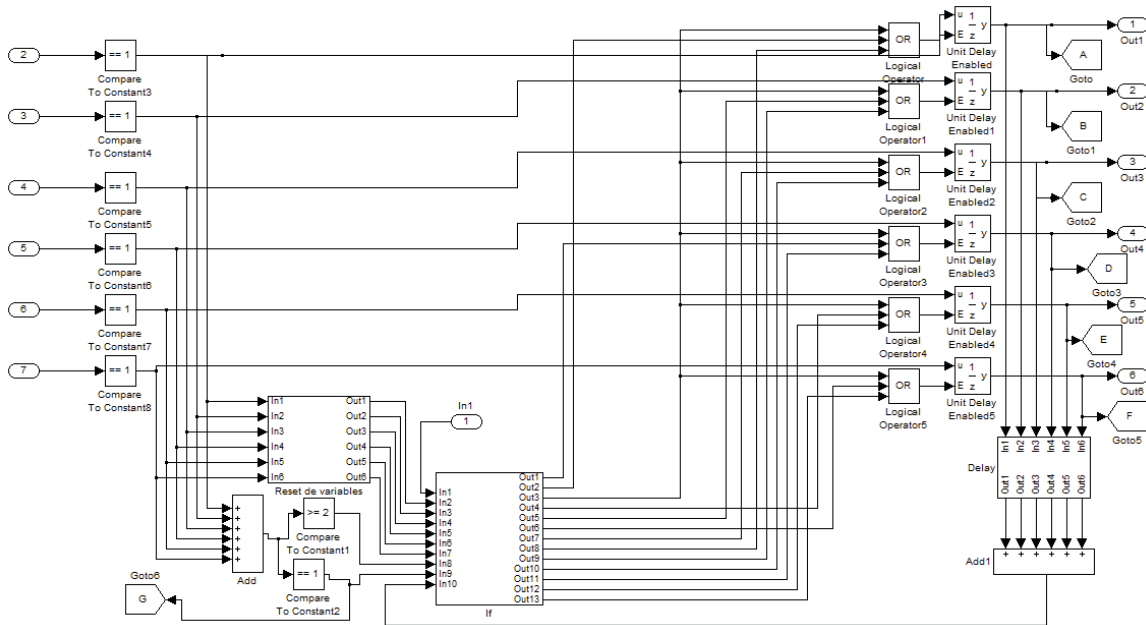


Figura 4-7 Algoritmo de control.

En la figura 4-8 se muestra el interior del bloque reset de variables el cual está compuesto por un bloque de delay con reset. Este bloque requiere una señal de nivel lógico alto en la entrada de reset para inhabilitar la señal de salida.

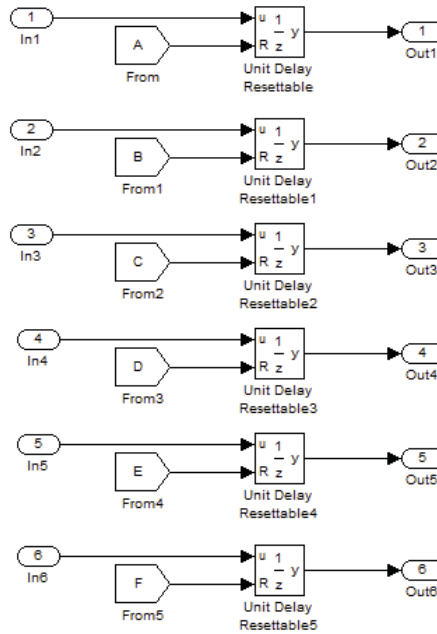


Figura 4-8 Reset de variables.

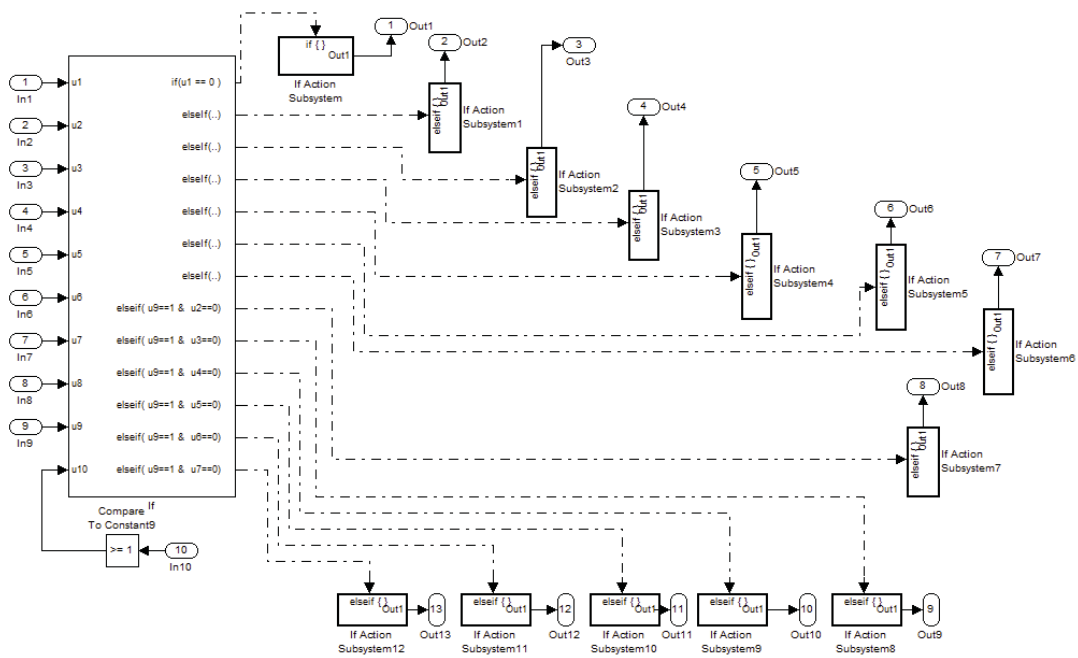


Figura 4-9 Sub sistema if.

En la figura 4-9 se muestra el subsistema if, el cual está compuesto de un bloque if y los subsistemas de acción correspondientes. Cada sub sistema de acción entrega un valor lógico alto al accionarse. Las variables de entradas son las siguientes:

- U1: Variable que indica si se alcanzó el nivel de corriente de seguridad y se debe realizar el secuenciado.
- U2: Señal de solicitud de accionamiento grúa 1.
- U3: Señal de solicitud de accionamiento grúa 2.
- U4: Señal de solicitud de accionamiento grúa 3.
- U5: Señal de solicitud de accionamiento grúa 4.
- U6: Señal de solicitud de accionamiento grúa 5.
- U7: Señal de solicitud de accionamiento grúa 6.
- U8: Señal que tiene un valor lógico alto cuando solicitan accionar más de dos grúas.
- U9: Señal que tiene un valor lógico alto cuando solicita accionar sólo una grúa.
- U10: Señal que tiene un valor lógico alto mientras ocurre el delay de cuatro segundos cuando están solicitando accionar dos grúas o más.

Para poder realizar el secuenciado, el bloque if tiene 13 salidas, en donde cada una corresponde a:

- Out1: Entrega una señal de nivel lógico alto cuando $u1==0$, o sea el nivel de corriente no excede el límite definido por lo que se permite el accionamiento de todas las grúas sin retardo.
- Out2: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 1 cuando $u2==1 \ \& \ u8==1 \ \& \ u10==0$, o sea detecta la solicitud de accionamiento de la grúa 1 junto con una adicional pero además que no existe accionamiento previo de una grúa que accione el bloque de delay.
- Out3: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 2 cuando $u3==1 \ \& \ u8==1 \ \& \ u10==0$.
- Out4: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 3 cuando $u4==1 \ \& \ u8==1 \ \& \ u10==0$.
- Out5: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 4 cuando $u5==1 \ \& \ u8==1 \ \& \ u10==0$.
- Out6: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 5 cuando $u6==1 \ \& \ u8==1 \ \& \ u10==0$.
- Out7: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 6 cuando $u7==1 \ \& \ u8==1 \ \& \ u10==0$.
- Out8: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 1 cuando $u9==1 \ \& \ u2==1$.
- Out9: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 2 cuando $u9==1 \ \& \ u3==1$.
- Out10: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 3 cuando $u9==1 \ \& \ u4==1$.
- Out11: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 4 cuando $u9==1 \ \& \ u5==1$.
- Out12: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 5 cuando $u9==1 \ \& \ u6==1$.

- Out13: Entrega una señal de nivel lógico alto para accionar la grúa 6 cuando $u9==1$ & $u7==1$.

En la figura 4-10 se muestra el interior del bloque de delay el cual está compuesto de seis entradas provenientes de las señales de accionamiento de las grúas, un detector de flanco de subida el cual acciona un retardo de apagado, el que al detectar el cambio de nivel lógico bajo a alto cambia la señal de salida a nivel alto y luego de un tiempo de cuatro segundos la cambia a nivel lógico bajo o cero. Esta señal de salida va directo a un sumador y luego al bloque if para detectar que mientras este se esté realizando este retardo no se accionen ninguna grúa. En otras palabras, esta señal indica que hay operación de una grúa y está en periodo transitorio.

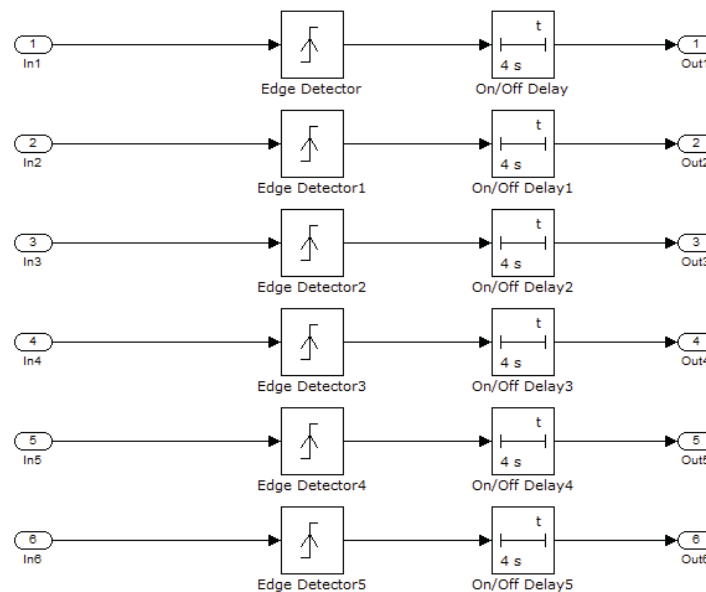


Figura 4-10 Bloque de delay.

4.6 Resultados de la simulación

A continuación se presentaran tres escenarios de simulación con lo que se podrá comprobar el funcionamiento del algoritmo y detectar las mejoras a realizar para el modelo final.

4.6.1 Simulación con corriente bajo nivel de seguridad

En primer lugar se verifica que el sistema no interfiere con el funcionamiento normal en caso de que la corriente del alimentador permita el accionamiento simultáneo de todas las grúas, esto es muy importante ya que sólo en verano es que se produce el accionamiento de protección 52G debido a la gran cantidad de contenedores refrigerados conectados a la red de STI.

En la figura 4-11 se pueden ver las señales de solicitud de accionamiento provenientes de cada grúa. Para este caso se simula el accionamiento simultaneo con $u1==0$.

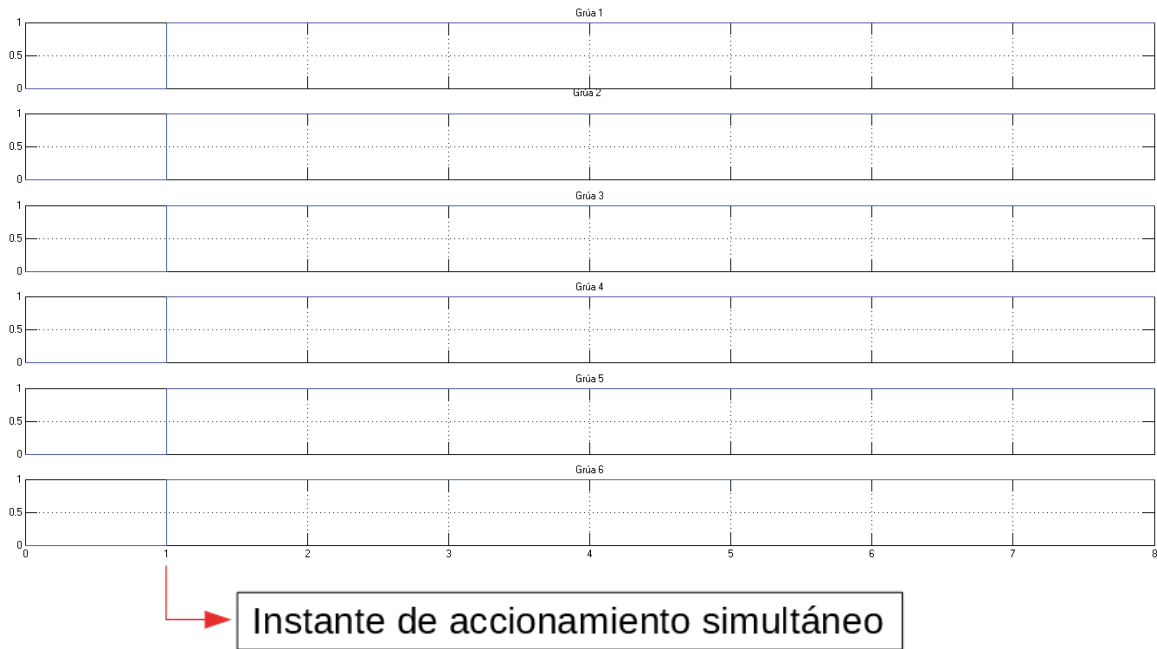


Figura 4-11 Señales de entrada al sistema.

En la figura 4-12 se muestran las señales de salida del algoritmo, las cuales permiten el accionamiento. Los resultados son según lo esperado, ya que al tener una medición de corriente bajo el nivel de seguridad permitiendo el accionamiento simultáneo. Para este caso también se probaron simulaciones con tiempos distintos de solicitud de accionamiento y siempre con un resultado de salida idéntico al de entrada. Además si se compara con la imagen 4-11, estas resultn idénticas.

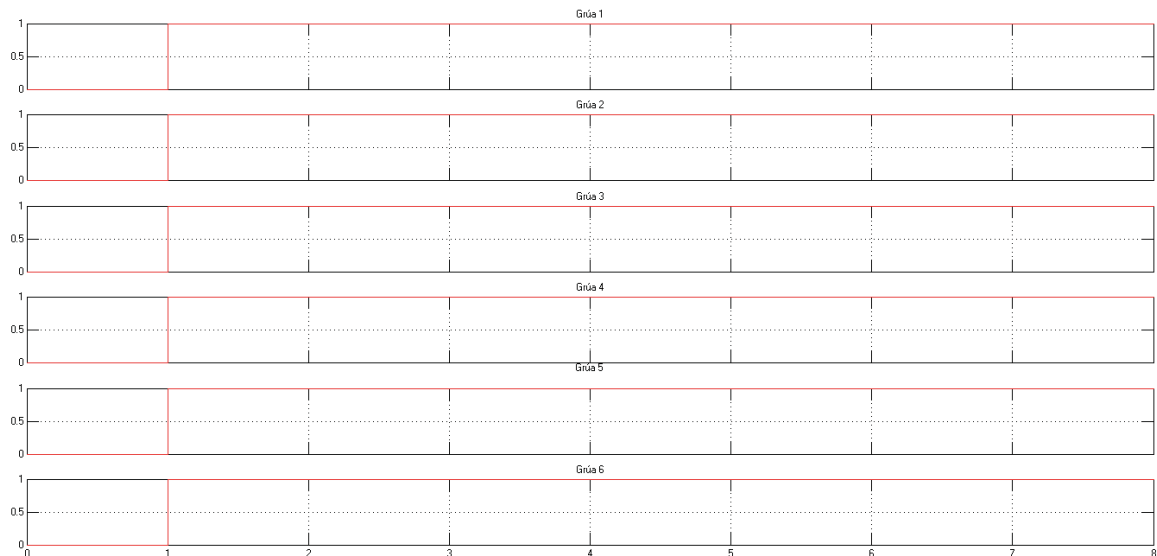


Figura 4-12 Señales de salida o de accionamiento.

4.6.2 Simulación de partida simultánea con corriente sobre valor de seguridad

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo, se verifica el peor de los casos o sea el accionamiento simultáneo de todas las grúas, de igual forma que lo observado en la figura 4-11. Para este caso se ha considerado una lista de prioridad establecida por la secuencia en el ciclo if por lo que el accionamiento será desde la grúa 1 a la 6 correspondientemente. En la figura 4-13 se puede observar el resultado de la simulación y se aprecia un desfase de 4 segundos entre el accionamiento de las señales de salida.

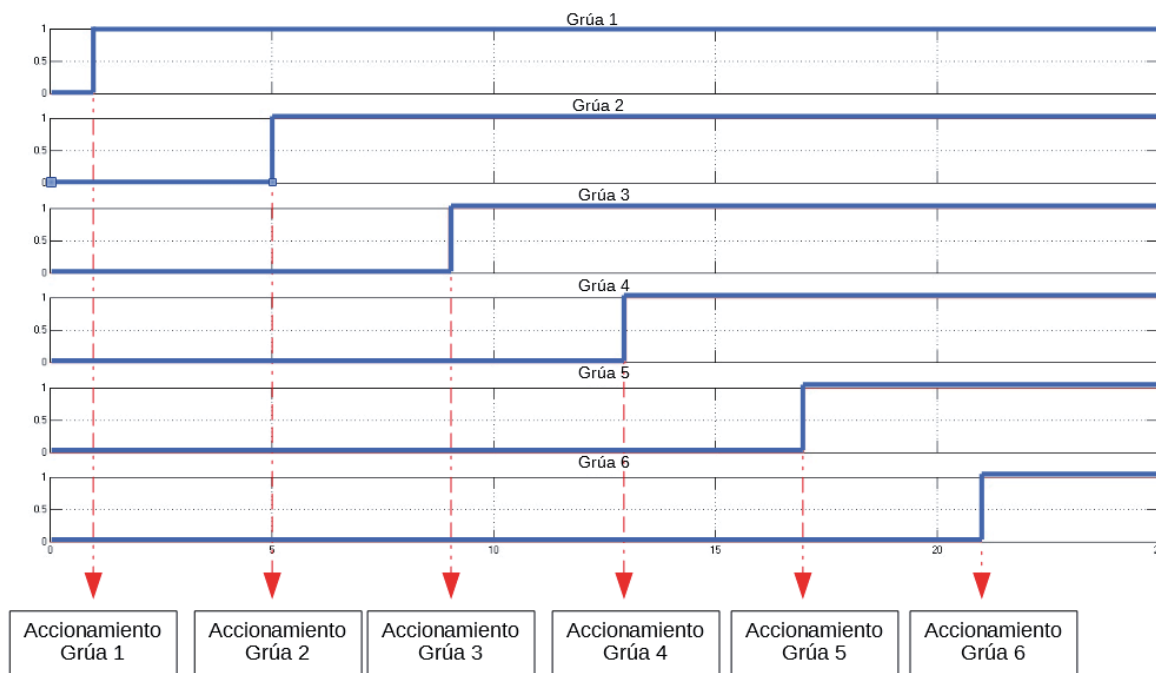


Figura 4-13 Señales de salida o de accionamiento.

4.6.3 Simulación con partida desfasada inversa

En este caso se simula una partida desfasada por tiempos de un segundo comenzando por la grúa 6 transcurrido un segundo de simulación y terminando en 1 a los seis segundos de simulación..

En la figura 4-14 se puede observar las señales de entrada o solicitudes de partidas.

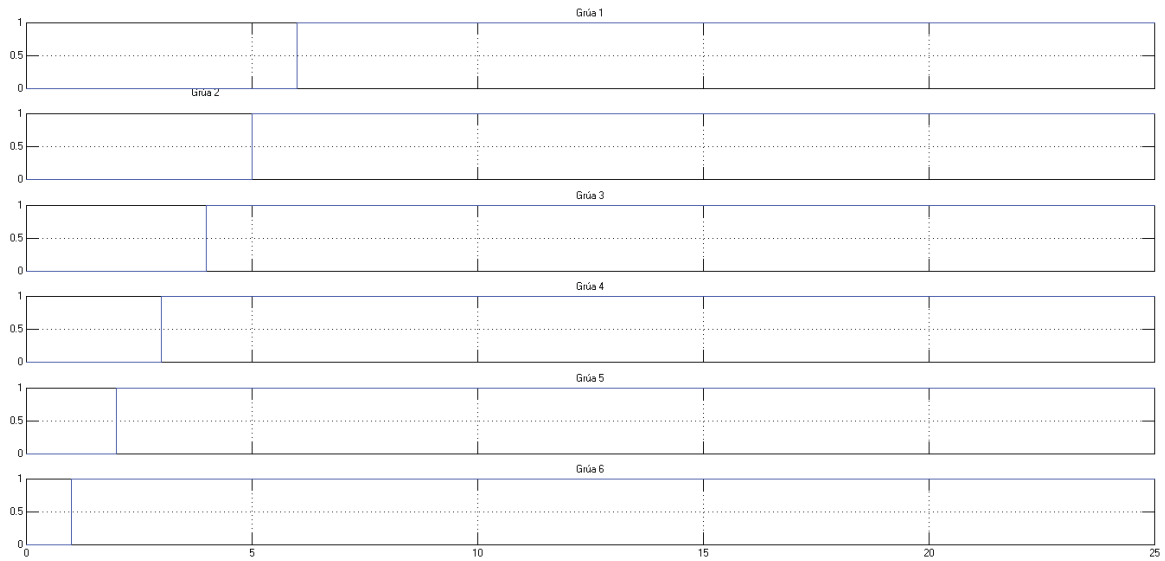


Figura 4-14 Señales de entrada al sistema

En la figura 4-15 se puede apreciar que en primer lugar se acciona la grúa 6 pero luego a los 5 segundos la grúa 2. Esto coincide ya que se debe considerar que el sistema opera de acuerdo a la lista de prioridades descrita anteriormente. Finalmente se observa que las grúas operan de manera desfasada pero falta establecer listado de accionamiento en cola.

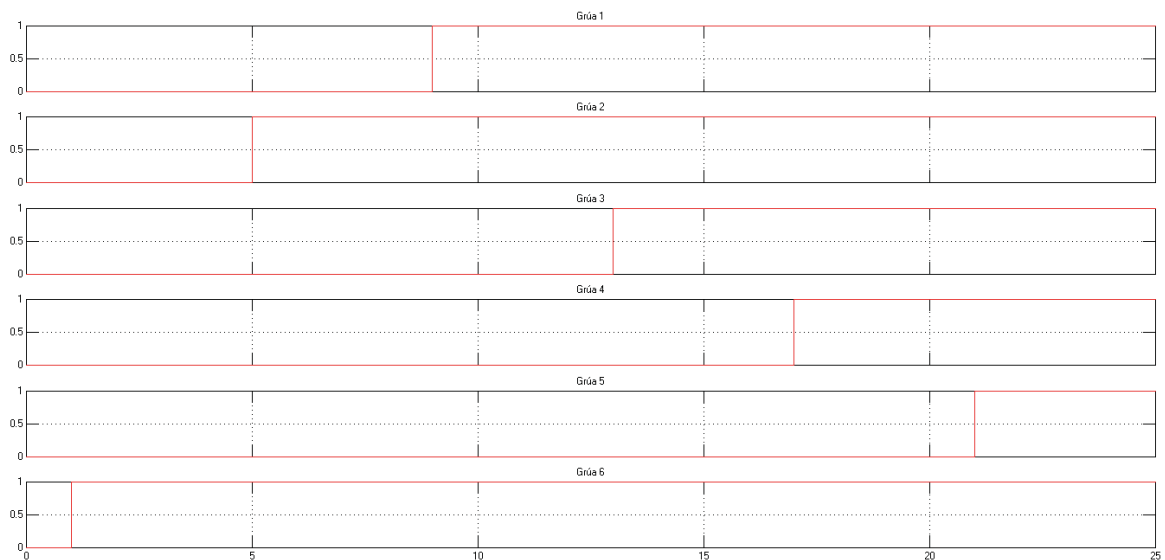


Figura 4-15 Señales de salida o de accionamiento.

4.7 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se pudieron observar los puntos que se tuvieron en cuenta para desarrollar una versión preliminar del modelo de operación multi-grúa y finalmente se analizaron tres modos de funcionamiento y operación del algoritmo de control. Se pudo observar que el sistema cumple con evitar la partida simultánea de las grúas y que faltaría formular un sistema de

almacenamiento de datos en cola para priorizar el secuenciado de las grúas que solicitan el accionamiento en primer lugar por sobre la lista de prioridad establecida en el bloque if.

Se debe destacar que la versión del modelo de operación desarrollado en Simulink considera el peor de los casos, y resulta muy sencillo tener que modificarlo para que opere ante el accionamiento de tres o más grúas de manera simultánea como se había considerado anteriormente. Lo mismo ocurre en el caso de que establezcan niveles de operación para diferentes lecturas de corriente en el alimentador.

Finalmente se debe destacar que el modelo realizado solamente en Simulink será modificado para la versión final, la cual incluirá un archivo de extensión .m para simplificar la comprensión del sistema y utilizando el lenguaje de programación de Matlab. Con esto se facilitaran posibles implementaciones o traducciones a otros lenguajes de programación.

5 Desarrollo de modelo completo

En el presente capítulo se explicara el funcionamiento y componentes de la versión final del algoritmo de control realizado utilizando el software Matlab. Se utiliza la aplicación Simulink en conjunto con una función escrita en el lenguaje de programación de Matlab para diseñar y realizar pruebas.

5.1 Esquema de Simulink.

En la figura 5-1 se observa el sistema simulado el cual está compuesto por siete bloques de escalón que representan las solicitudes de accionamiento de las grúas y la señal de corriente del alimentador. Además posee el bloque Matlab function, en el cual se encuentra el algoritmo de secuenciado de grúas haciendo referencia a un fichero de extensión .m, seis delay unitarios sin retardo, una realimentación y finalmente dos osciloscopios para poder observar las señales de entrada y salida.

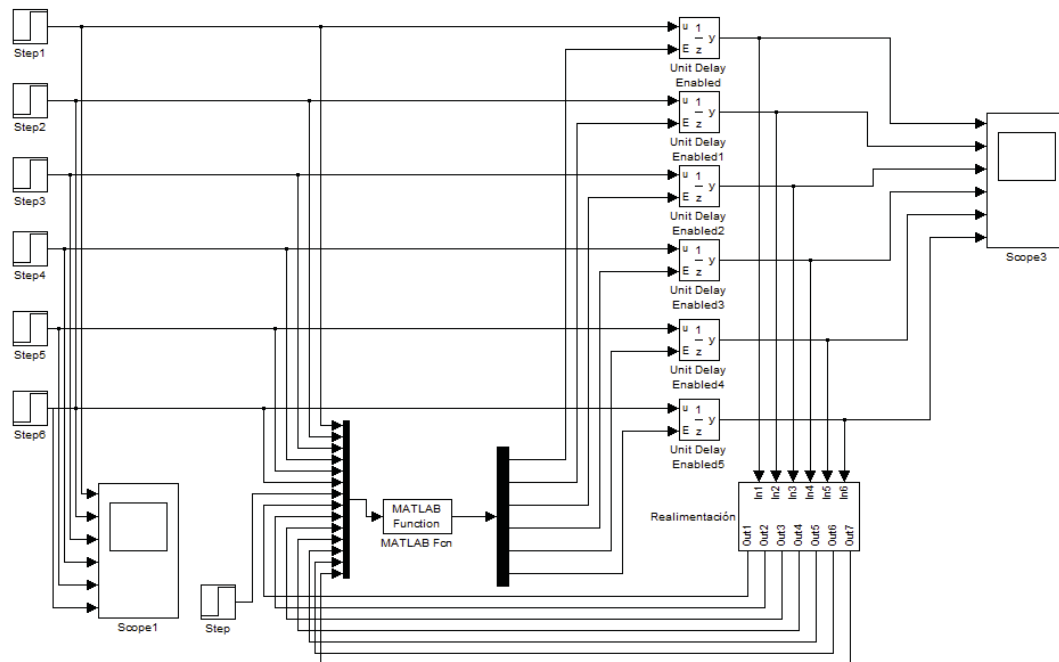


Figura 5-1 Modelo simulado en Simulink.

Para este caso los bloques de delay no tienen un retardo designado, sólo opera como un relay ya que permite el paso de la señal de entrada luego de recibir una señal de nivel lógico alto y se mantiene de este modo hasta que la señal de entrada cambia de estado.

Además en la figura 5-1 se puede observar que existe un subsistema de realimentación. Este bloque está compuesto de seis entradas provenientes del accionamiento de las grúas, un detector de flanco de subida el cual acciona un retardo de apagado que al detectar un cambio de nivel lógico bajo a alto cambia la señal de salida a nivel alto y luego de un tiempo de cuatro segundos la cambia a nivel lógico bajo o cero. Las señales temporizadas se suman para entregar una señal que indica la cantidad de máquinas que se encuentran en periodos transitorios. Finalmente se tienen siete señales de salida siendo seis de ellas la señal de accionamiento de cada máquina y la señal que indica la cantidad de máquinas en régimen transitorio. Lo descrito anteriormente se puede observar en la figura 5-2.

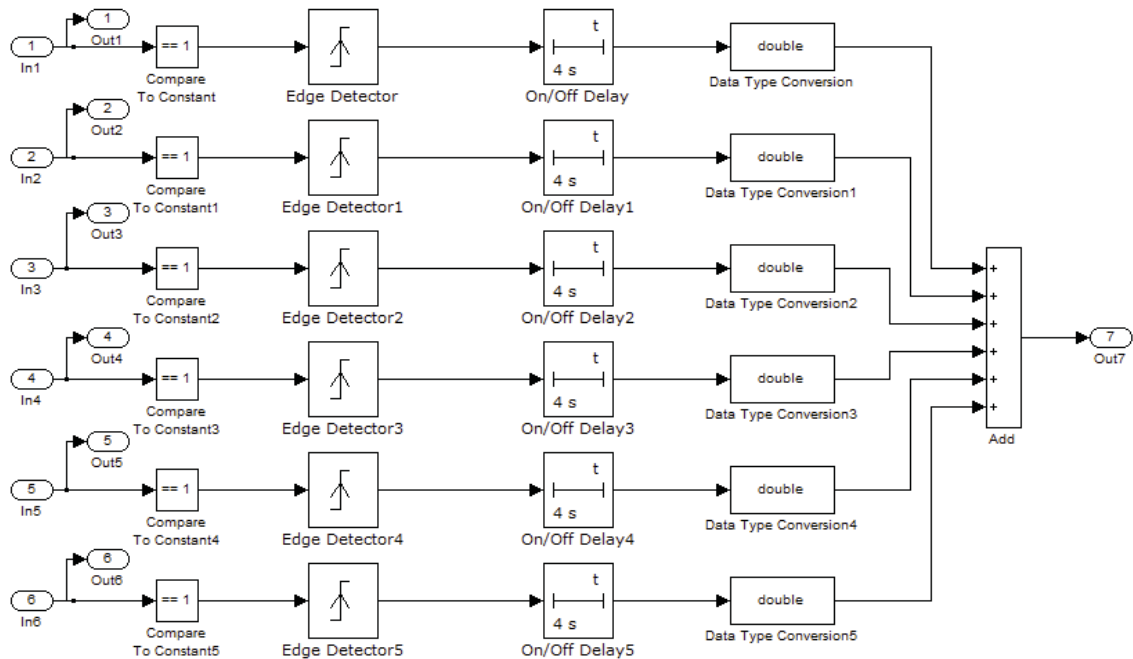


Figura 5-2 Bloque de realimentación.

También se puede observar que existen bloques "Compare to constant" y "data type Conversion" los cuales tienen la función de convertir una señal double a booleana y viceversa.

5.2 Código en fichero .m

Para poder realizar un modelo de operación totalmente funcional, fue necesario desarrollar una función de Matab de extensión .m que se pudiera ejecutar en conjunto con Simulink. Además se debió definir una variable de tipo persistent para almacenar valores en cola, ya que este tipo de variables tiene la principal característica de mantener almacenado su valor incluso mientras se realizan múltiples llamados a la función. En el listado 5-1 se puede ver el código fuente de la función llamada Algoritmo final en donde en primer lugar se declaran las variables a utilizar, se

almacenan valores en cola o realiza la lectura de esta y se ejecuta sentencia if la cual contiene los diversos casos que pueden ocurrir en la operación de seis grúas operando en conjunto y para diferentes niveles de corriente del alimentador.

Listado 5-1: Código de función de secuenciado.

```

1 function y = algoritmofinal(u)
2
3 in=[u(1) u(2) u(3) u(4) u(5) u(6)]; %Señales de entrada
4 c=u(7); %Corriente del alimentador
5 persistent Q %Matriz almacena valores en cola
6 q2=[0 0 0 0 0 0]; %Cola de referencia
7 tmr=u(14); %Timer que indica cuales máquinas
8 %se encuentran en transciente
9 r=[u(8) u(9) u(10) u(11) u(12) u(13)]; %Matriz de realimentación
10 n=in-r; %Nueva variable de ingreso
11 out=[0 0 0 0 0 0];
12
13 if (isempty(Q)) %Si no hay valores en cola se
14 %realiza lectura de variables
15 %de entrada y almacena en cola
16 Q=[];
17 for i=1:1:6
18 if (n(i)==1)
19 Q=[Q,i];
20 end
21 disp(Q);
22 end
23 elseif (~isempty(Q)) %Si hay valores en cola, se
24 [a,b]=size(Q); %ingresan nuevos valores en caso de
25 for i=1:1:b %existir nueva variable de entrada.
26 q2(Q(i))=1;
27 end
28 x=n-q2;
29 for i=1:1:6
30 if (x(i)==1)
31 Q=[Q,i];
32 end
33 end
34 end
35 [a,b]=size(Q);
36 %Distintas consideraciones para realizar el secuenciado
37 %Se considera nivel de corriente(c), cantidad de variables de entrada,
38 %variables en transitorio y dimensión de cola(Q).
39
40 if (c>=240 && c<280 && sum(in)==6 && tmr<5 && b~=0)
41 out(Q(1))=1;
42 Q(1)=[];
43
44 elseif (c>=240 && c<280 && sum(in)<6 && tmr<6 && b~=0)
45 out(Q(1))=1;
46 Q(1)=[];
47
48 elseif (c>=280 && c<320 && sum(in)>=5 && tmr<4 && b~=0)
49 out(Q(1))=1;
50 Q(1)=[];
51
52 elseif (c>=280 && c<320 && sum(in)<5 && tmr<4 && b~=0)
53 out(Q(1))=1;
54 Q(1)=[];
55
56 elseif (c>=320 && c<360 && sum(in)>=4 && tmr<3 && b~=0)
57 out(Q(1))=1;
58 Q(1)=[];
59
60 elseif (c>=320 && c<360 && sum(in)<4 && tmr<3 && b~=0)
61 out(Q(1))=1;
62 Q(1)=[];

```

```

63
64 elseif (c>=360 && c<400 && sum(in)>=3 && tmr<2 && b~=0)
65     out(Q(1))=1;
66     Q(1)=[];
67
68 elseif (c>=360 && c<400 && sum(in)<3 && tmr<2 && b~=0)
69     out(Q(1))=1;
70     Q(1)=[];
71
72 elseif (c>=400 && sum(in)>=2 && tmr==0 && b~=0)
73     out(Q(1))=1;
74     Q(1)=[];
75
76 elseif (c<240)
77     out=[1 1 1 1 1 1];
78
79 elseif (sum(Q)~=0 && tmr==0)
80     out(Q(1))=1;
81     Q(1)=[];
82
83 end
84 y=out;

```

El código que se muestra en el listado 5-1 se probó en conjunto con el modelo de Simulink que se muestra en la figura 5-1. Para utilizar la función se utiliza el bloque “Matlab function” en el cual se indica la función a la cual debe hacer referencia. En la figura 5-3 se puede ver la ventana que permite configurar el mencionado bloque y debe hacer referencia al fichero que contiene el código de la función, en este caso es el mencionado “algoritmofinal.m”. Además se debe considerar que tanto el modelo de Simulink cómo el fichero de extensión .m deben estar contenidos en una misma ubicación o carpeta. Además se destaca que la función considera accionamientos para distintos niveles de corriente lo cual se puede ver en el ciclo if (entre las líneas 41 a 84).

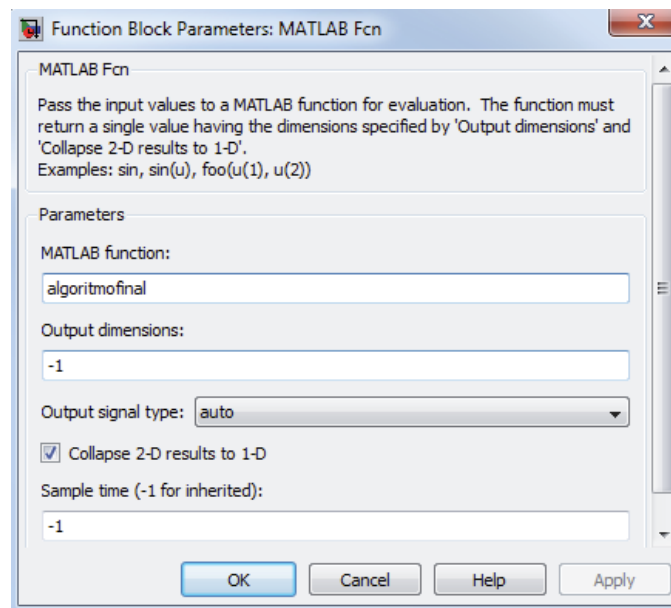


Figura 5-3 Parámetros de bloque Matlab function.

Para poder comprender de manera más simple y sencilla la operación de la función escrita en el lenguaje de Matlab que se describió anteriormente se presenta a continuación en la figura 5-4 un diagrama de flujos en donde se pueden observar los principales pasos o procedimientos que realiza el programa durante la simulación. Se debe destacar que dependiendo del nivel de corriente que se detecte en el alimentador es el resultado de accionamiento, pudiendo habilitar en el peor caso sólo una grúa y a medida que decrece la corriente se va a permitir el accionamiento simultáneo hasta llegar a las seis grúas en conjunto.

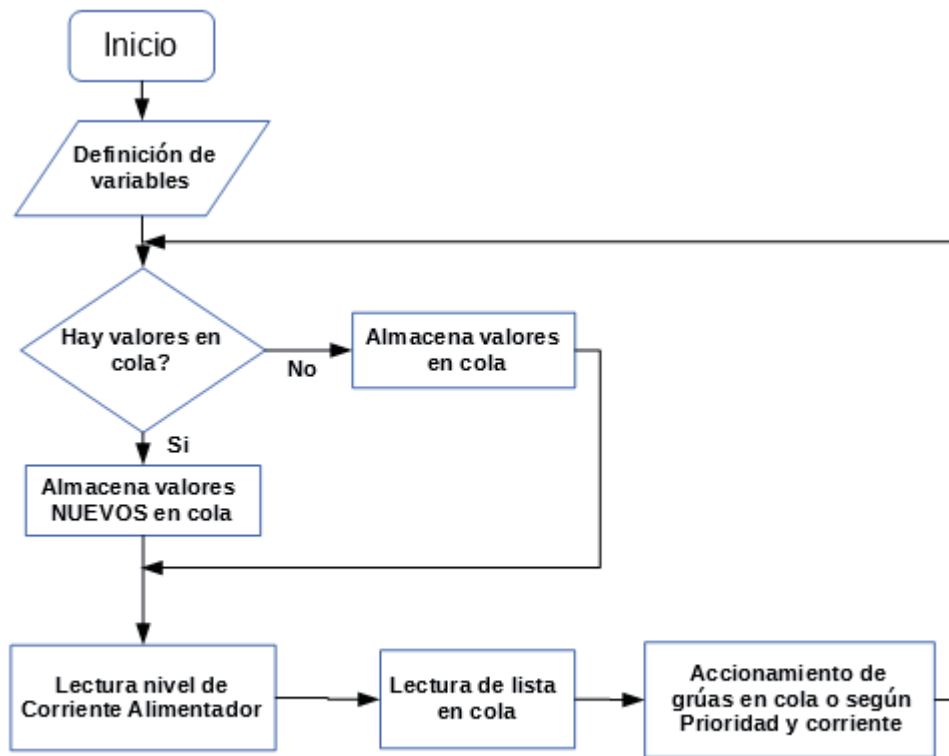


Figura 5-4 Diagrama de flujos de algoritmo.

5.3 Resultados de simulación

Debido a la complejidad del bloque de la máquina asíncrona con control directo del torque se realizan simulaciones con un modelo idealizado y discreto para acelerar el proceso de desarrollo del algoritmo en Matlab. Utilizando este método se reduce el tiempo de espera para probar el funcionamiento del modelo de un par de horas a solo algunos segundos y se obtienen las señales de activación para cada máquina.

En la figura 5-4 y con color azul se pueden observar las señales de entradas o solicitudes de accionamiento para cada grúa, estas son procesadas por el modelo de operación diseñado, el cual realiza el secuenciado o permite el accionamiento de manera normal dependiendo del nivel de corriente que posea el alimentador. Se puede ver que las solicitudes de accionamiento se realizan

en intervalos de un segundo, comenzando desde uno hasta llegar a seis. Se debe destacar que para esta simulación se considera que el nivel de corriente se encuentra en el nivel más alto por lo que solo permite la operación de sólo una grúa en periodo transitorio.

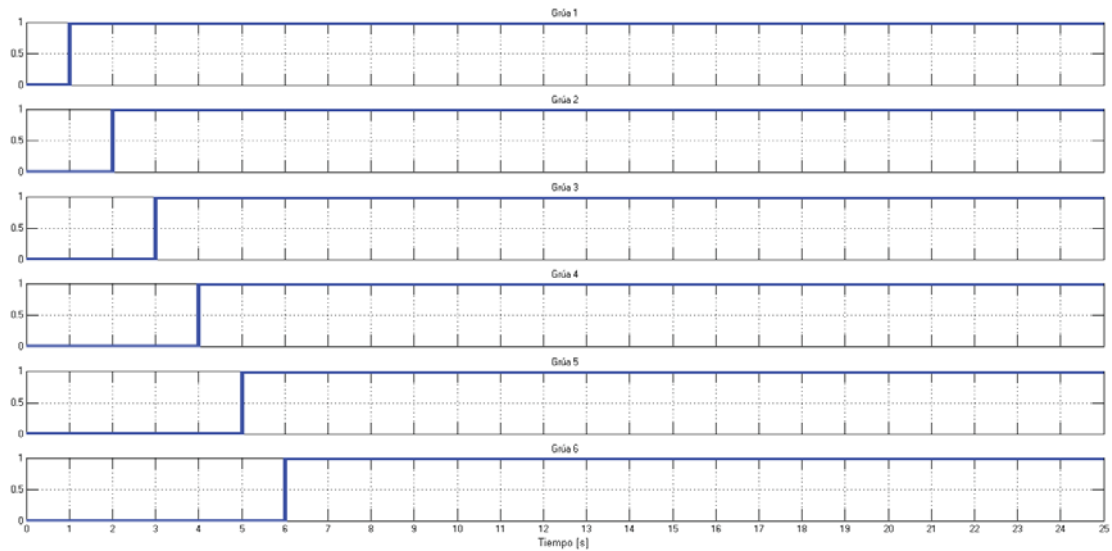


Figura 5-5 Señales de entrada o solicitudes de accionamiento.

Como resultado de las solicitudes anteriores, las señales de salida se muestran en la figura 5-6. En esta se puede observar que se realiza un secuenciado el cual bloquea las señales de salida para intervalos cada cuatro segundos, tiempo que dura el transitorio de corriente. Si se compara con los resultados del capítulo anterior en la versión preliminar del modelo, se observa que existe el mismo comportamiento obteniendo las mismas señales de salida.

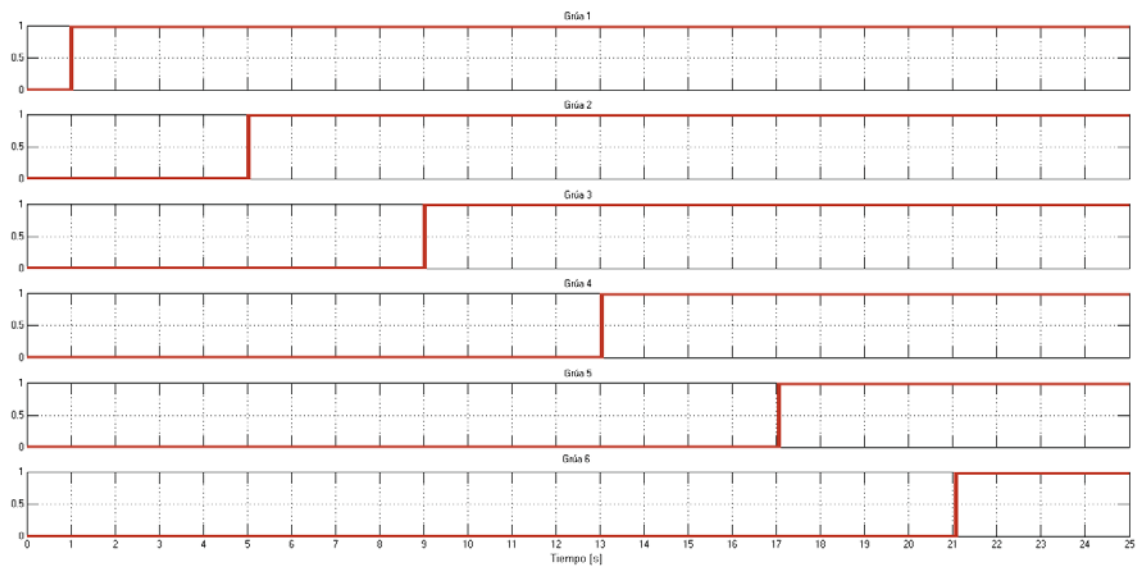


Figura 5-6 Señales de salida o de accionamiento de grúas.

Se analiza el siguiente caso para verificar el mal funcionamiento del modelo presentado en el capítulo anterior. Como se puede ver en la figura 5-6 se muestran las señales de entrada o solicitudes de accionamiento, las cuales no tienen un patrón correlativo. Al igual que para el caso anterior se simula el peor caso, en el cual sólo se permite el accionar de una grúa durante los transitorios de corriente.

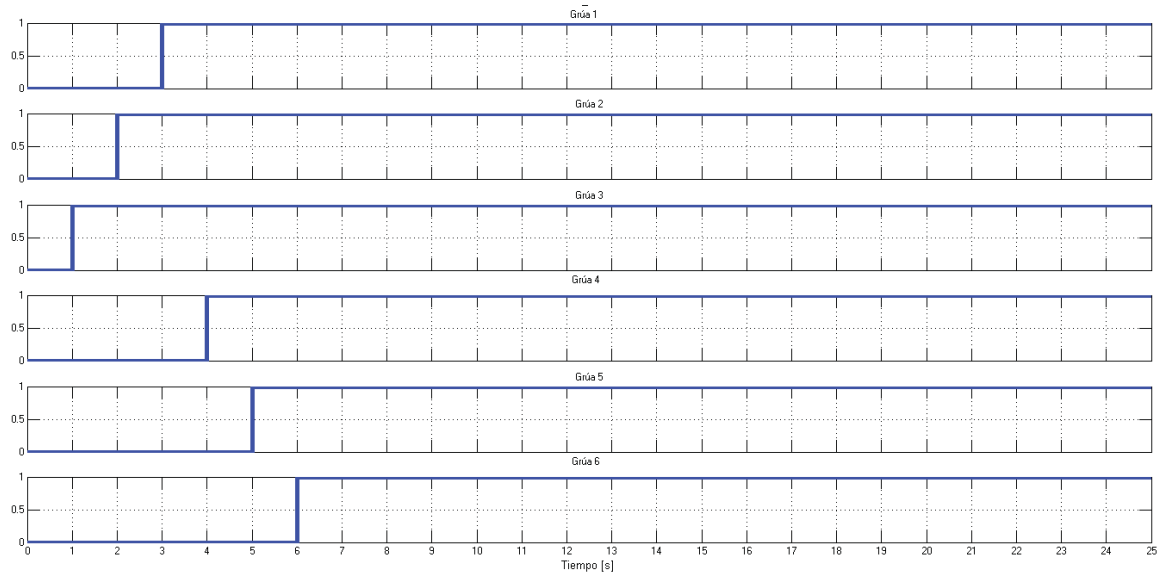


Figura 5-7 Señales de entrada o solicitudes de accionamiento.

En la figura 5-7 se muestran los resultados luego de aplicar el modelo de secuenciado. Se puede apreciar que se mantiene la misma secuencia o patrón de entada de variables pero a la salida se encuentran desfasadas en cuatro segundos por lo que no se traslaparían los transitorios de partida.

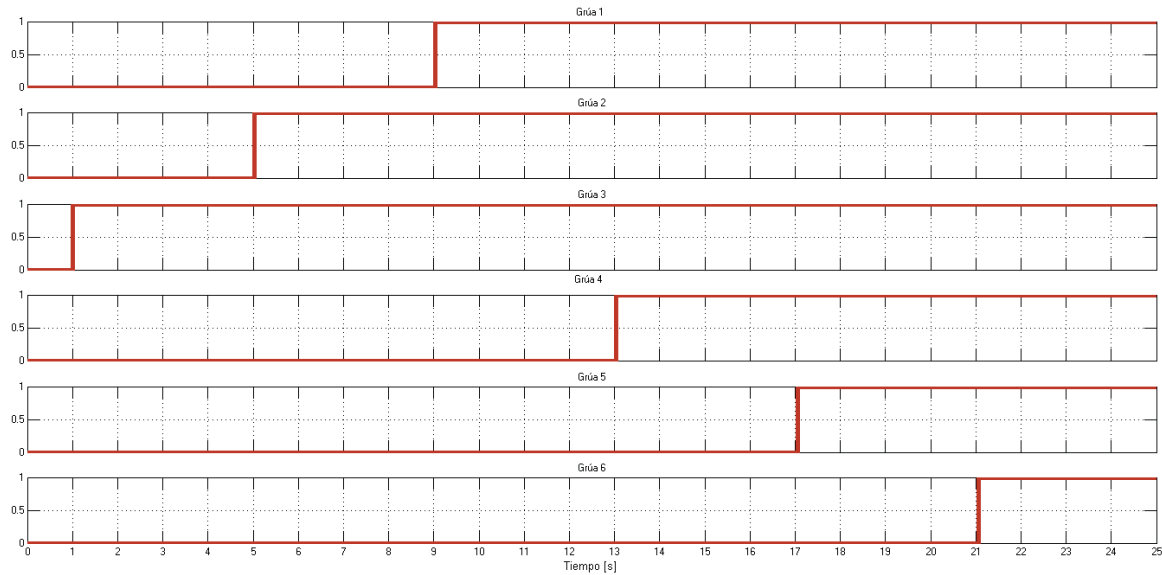


Figura 5-8 Señales de salida o de accionamiento de grúas.

5.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo finalmente se muestran dos ejemplos que se consideran como los más significativos, en los cuales se analiza el peor caso o el caso que entrega la motivación para este proyecto y permiten verificar el funcionamiento del modelo diseñado. Se debe tener en cuenta que el modelo de operación abarca todos los casos de operación y tiene distintos accionamientos para todo el rango de nivel de corriente en el alimentador, esto significa que en el peor caso permite sólo el accionar de una máquina y a medida que la corriente va decreciendo permite accionar simultaneo de grúas hasta llegar a un nivel cercano a los 200 [A] en el cual se permite el accionar libre de los motores de las máquinas.

Finalmente y luego de realizar diversas simulaciones, las cuales abarcan todos los posibles casos de operación, se considera que las simulaciones preliminares cumplen el objetivo propuesto por lo que deberían solucionar el problema de sobrecorriente en el alimentador. De todos modos para poder obtener una visión completa del problema se debe realizar la integración del algoritmo en conjunto con las máquinas con control directo del torque.

6 Resultados finales

En el presente capítulo se presentan las simulaciones previas junto con los resultados obtenidos luego de utilizar el modelo de control para evitar que se accione la protección de sobrecorriente en el alimentador de 12 [KV] con la finalidad de comparar los resultados.

6.1 Simulación original

Para poder solucionar el problema que se presenta en el terminal portuario STI, se realiza una simulación completa del sistema considerando como cargas inductivas a los reefer y otras cargas asociadas como iluminación, oficinas, etc. Esto en conjunto con los motores principales de cada grúa STS, por lo que para cada grúa se consideran dos motores de 940 [HP].

En la figura 6-1 se puede observar el modelo completo en el cual se simulan las condiciones al momento de la falla. Debido a que lo importante para esta simulación es el resultado de corriente en el alimentador se pudieron eliminar señales y osciloscopios para cada máquina ya que su comportamiento individual fue estudiado con anterioridad.

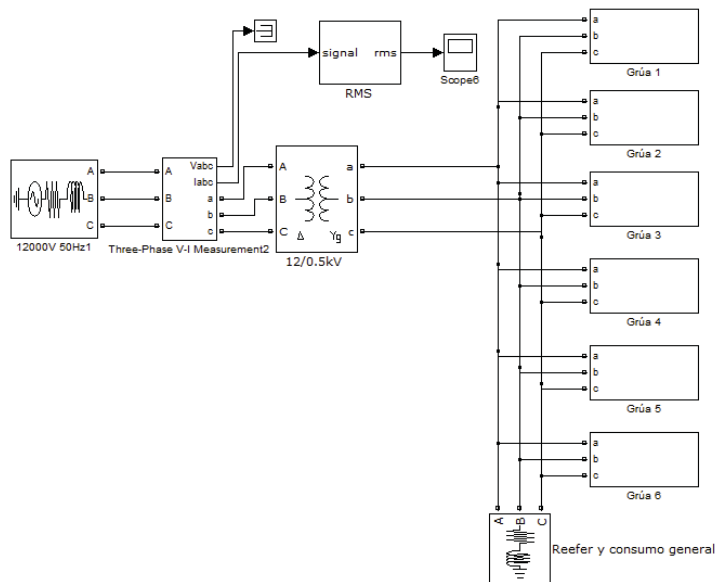


Figura 6-1 Modelo que simula STI en su totalidad al momento de la falla.

En la figura 6-2 se muestra el interior del subsistema que corresponde a cada grúa, en este se pueden observar las dos máquinas de inducción con control directo del torque en paralelo y con sus señales de activación correspondientes.

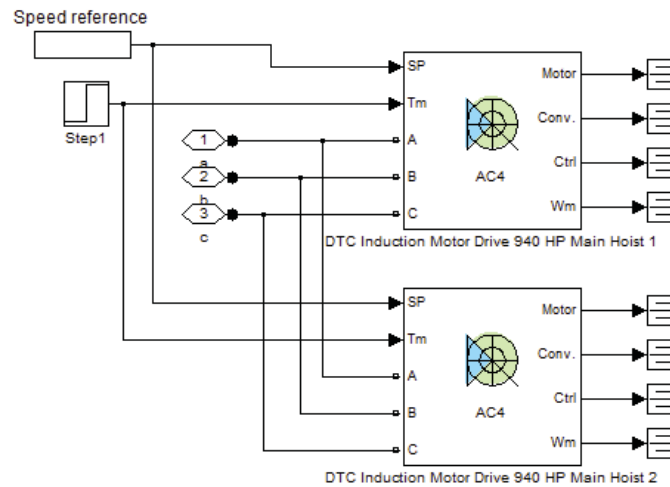


Figura 6-2 Subsistema para cada grúa.

Al realizar la simulación completa se considera el accionamiento de 6 grúas STS junto con 1616 reefer conectados a la red, iluminación y oficinas del terminal portuario. Con todo lo anterior se obtiene la curva de corriente que se muestra en la figura 6-3 y que además coincide con la curva obtenida en el informe emitido por la EIE al mencionado terminal. Se puede observar que el valor máximo de corriente llega a los 530 [A].

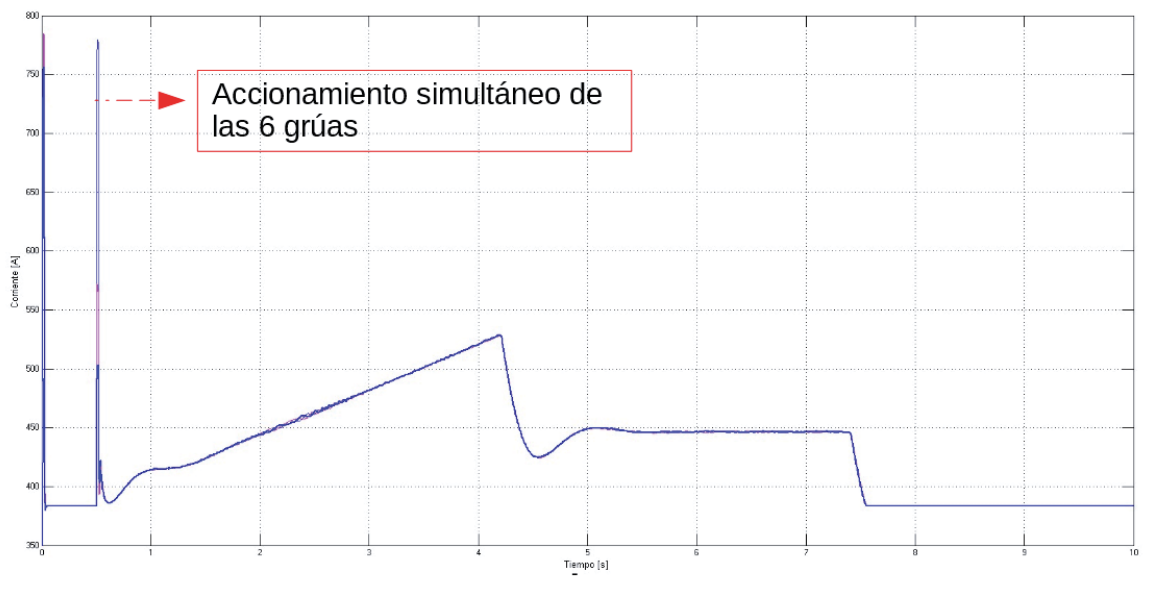


Figura 6-3 Corriente en el alimentador para partida simultánea.

Debido a que resulta muy improbable que se coincida totalmente con la simultaneidad en el accionamiento de las seis grúas se realiza una simulación adicional para poder comparar el comportamiento del alimentador de media tensión de STI. En la figura 6-4 se muestra una simulación que se pudiera asemejar más con la realidad del sistema, en donde comienza a operar la grúa número uno a los 0.5 [s] de comenzada la simulación, posteriormente comienzan a accionar las demás en secuencia cada 0.5 [s]. En la imagen se puede observar claramente este accionamiento ya que en ese instante se presenta un transitorio de corriente debido al accionar de cada máquina. Además para este caso no es de mayor relevancia el orden de accionamiento de las grúas ya que se busca observar la relación temporal junto con la demanda energética.

Se debe aclarar que este es un caso para ejemplificar las distintas posibilidades que pudieran ocurrir en el alimentador. Se puede observar que el peak de corriente llega a los 500 [A] por lo que para este caso también se puede accionar la protección de sobrecorriente si se tiene en cuenta la curva característica de esta.

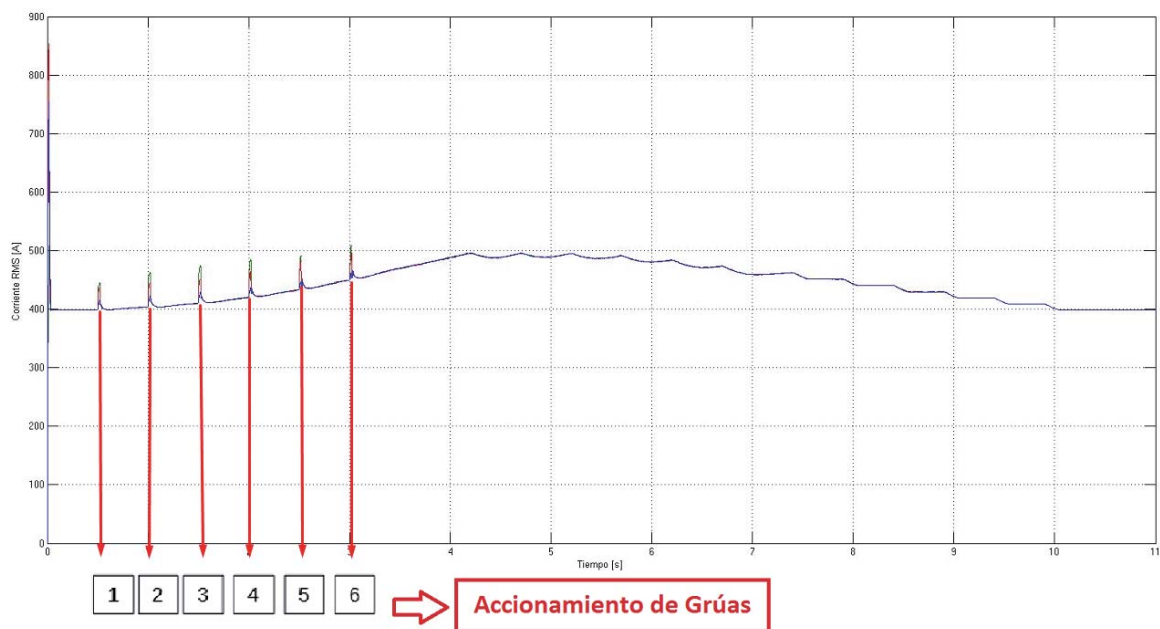


Figura 6-4 Simulación desfasada por 0.5 [s].

Del mismo modo que para el caso anterior se puede apreciar en la figura 6-5 un modelo más real de la posible falla en donde las máquinas no se accionan de manera simultánea por lo que se pueden observar los transitorios de corriente asociado a la partida de cada máquina. Para este caso el desfase entre el accionamiento de cada máquina es 0.2 [s] y se obtiene un peak de corriente de 550 [A] lo cual coincide con la operación de la protección 51-G del alimentador de media tensión del terminal portuario de acuerdo a los antecedentes recopilados.

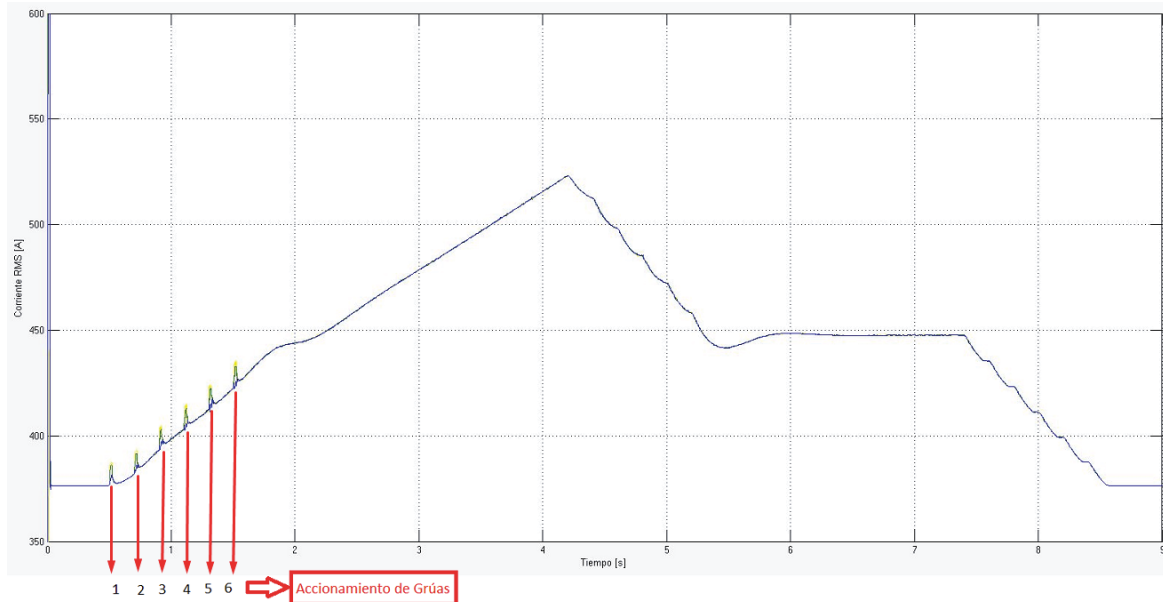


Figura 6-5 Accionamiento desfasado 0.2 [s].

Para los casos descritos anteriormente se debe aclarar que se obtuvieron niveles de corriente levemente menores comparados con los obtenidos en el informe realizado en nuestra escuela para STI pero la razón es que se utilizó un modelo simplificado del sistema en donde se dejaron de lado algunas de las máquinas de menor potencia que realizaban menores aportes en el consumo energético del terminal de contenedores.

6.2 Simulación utilizando el modelo de operación

Para poder verificar la efectividad del modelo de control que se expuso en el capítulo 5 se requiere ponerlo en funcionamiento con el sistema completo. Este sistema es el mismo que se muestra en la figura 6-1 pero se agrega el algoritmo de control junto con algunos bloques para realizar el accionamiento de las máquinas. El modelo simulado se muestra en la figura 6-5.

Para poder realizar la simulación controlada por el algoritmo de secuenciado se requirió instalar un delay sin retardo para permitir habilitar la señal de torque proveniente de un escalón de valor superior a uno, esto debido a que el algoritmo trabaja con valores booleanos. En la figura 6-6 se muestran los bloques agregados. Además se agregan bloques al interior de la referencia de velocidad pero resulta ser del mismo modo que el mostrado en la figura 6-6. El bloque from A se utiliza para no realizar el conexionado visual entre los bloques y así poder ver de mejor manera el modelo, este bloque lleva la misma señal que Goto A.

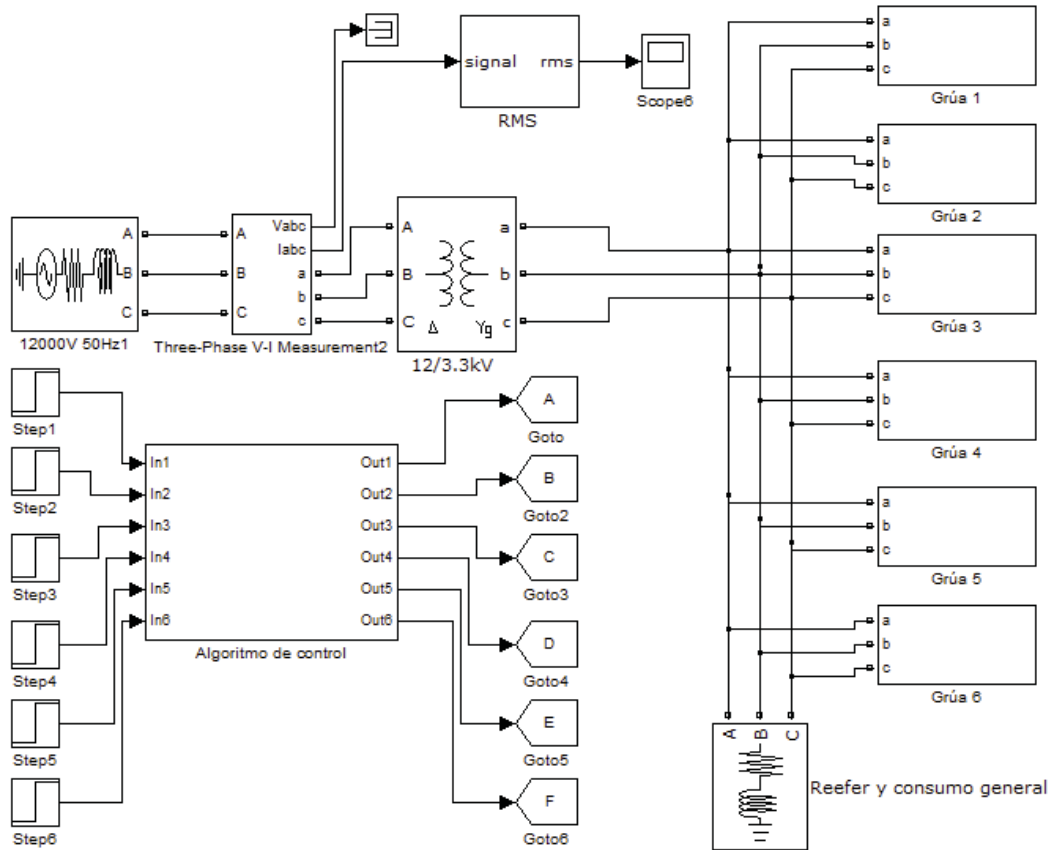


Figura 6-6 Modelo completo con modelo de secuenciado.

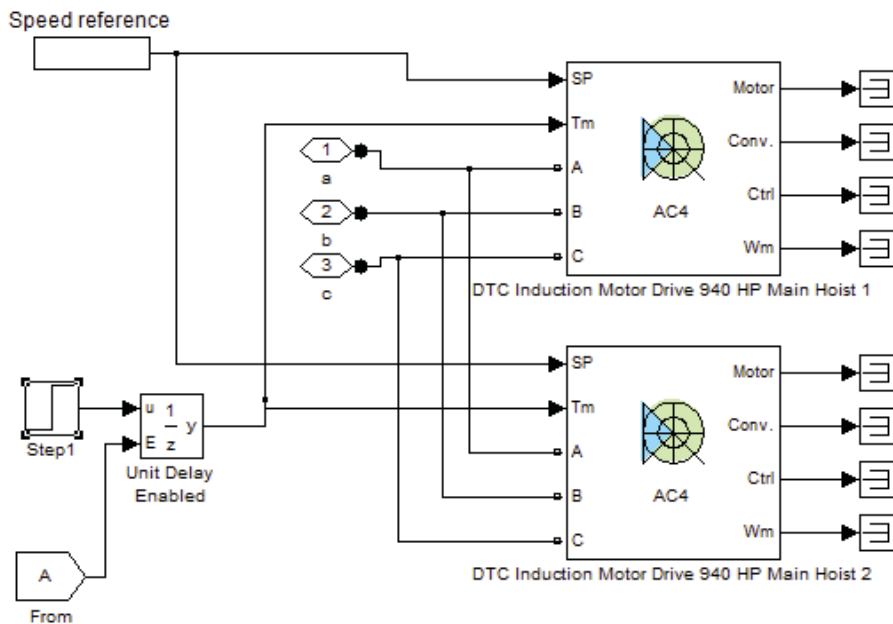


Figura 6-7 Modelo para cada grúa con bloques de control.

Finalmente se simula la partida simultánea de todas las grúas para las condiciones en que ocurre la falla de mismo modo que para el caso anterior en donde se llegó a un peak de 530 [A]. En la figura 6-8 se puede apreciar la curva de corriente RMS obtenida en el alimentador referido a una tensión de 12[KV], en esta se observa que el valor máximo de corriente obtenido, sin considerar la corriente in-rush del transformador y los transitorios de cada máquina, es de unos 430 [A]. Del mismo modo que se puede apreciar en la imagen, luego de transcurridos 0.5 [s] de la simulación se realiza la solicitud simultánea de todas las grúas pero el modelo de control permite solamente la activación de sólo una y bloquea las cinco restantes, transcurridos los 4 segundos que se establecieron como margen de seguridad se permite la partida de la grúa número dos y así sucesivamente hasta completar el ciclo con la grúa número seis.

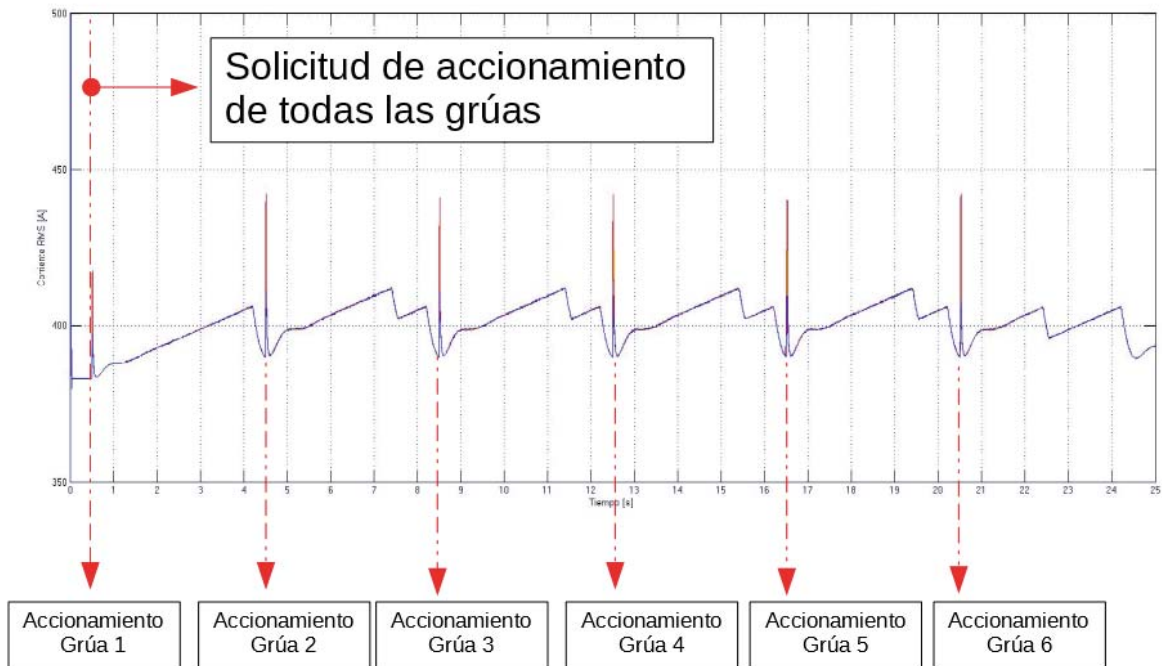


Figura 6-8 Resultado de la simulación final.

En la figura 6-9 se muestra otro caso particular para demostrar la funcionalidad del modelo de control desarrollado. Se presenta el caso de partida de las seis grúas de manera simultánea pero para un nivel de corriente inicial en el alimentador de 250 [A]. Se puede observar que el nivel máximo de corriente no supera los 400 [A] por lo que no existiría riesgo alguno de accionar la protección 51-G, además se debe considerar que luego de 0.5 [s] iniciada la simulación las 6 máquinas realizan la solicitud de accionamiento pero sólo se habilitan cinco para posteriormente transcurridos los 4 segundos de seguridad se habilita la grúa restante.

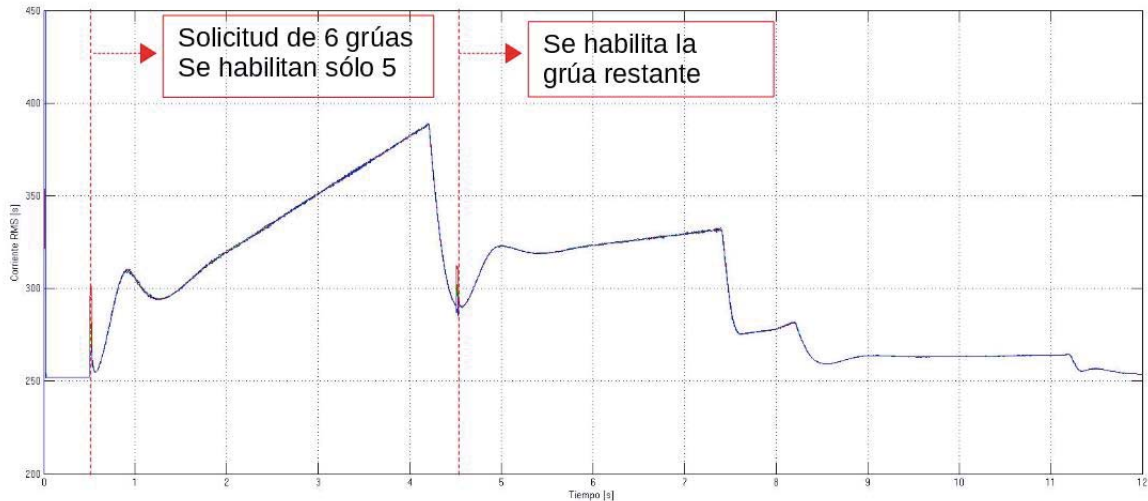


Figura 6-9 Operación para nivel de corriente 250 [A].

6.3 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se pudo realizar la simulación del sistema en su totalidad con la finalidad de tener una referencia para comprobar el correcto funcionamiento del modelo de operación para el control de un sistema multigrúa. Del mismo modo se pudo realizar la prueba del sistema de control diseñado en Matlab y Simulink para evitar las puntas de consumo y como se pudo ver en la imagen anterior este objetivo se cumplió a totalidad.

Se debe destacar que la simulación final tiene una duración de 25 segundos y los accionamientos se realizan en intervalos de 4 segundos por lo que la corriente se encuentra bajo el rango de los 400[A]. Se detecta que es posible se tenga un error de simulación ya que en la figura 6-68 no se registra aumento de corriente según lo esperado al realizar los primeros dos accionamientos.

Finalmente se puede decir que los resultados son según lo esperado en el capítulo 5 en donde se demostró la funcionalidad del modelo de control desarrollado pero quedaba pendiente demostrar finalmente si se solucionaba el problema planteado en un comienzo de este proyecto.

En conclusión se puede decir que se lograron todos los objetivos planteados para este proyecto de título.

Discusión y conclusiones

En primer lugar se puede concluir que luego de haber investigado y detallado acerca de las principales funciones y equipos eléctricos que generan el consumo principal de energía en la red eléctrica del San Antonio Terminal Internacional y características en general del puerto, se pudo cumplir con el primer objetivo presentado y que tiene relación con el estudio de un sistema de grúas portuarias. Se pudo analizar las distintas grúas y equipos conectados a la red eléctrica presentes en un terminal portuario como las grúas STS, RTG y los reefer principalmente.

Con respecto a la primera parte de este trabajo se puede decir que se ha recabado información de manera general con respecto al equipamiento que tienen los terminales portuarios de San Antonio y específicamente el terminal STI. Con esta información se puede definir que activación de la protección 51-G del alimentador de media tensión se produce debido a la sobrecarga producida por la gran cantidad de equipos reefer y en conjunto con las corrientes de partida que se producen en las grúas tipo STS que poseen motores de levante de gran potencia como se describió en los capítulos anteriores.

Si bien se difiere de lo que se sospechaba en un comienzo, es decir que la sobrecorriente ocurriera al realizar levante de contenedores con carga debido al torque necesario para sacar de inercia el conjunto, se pudo evidenciar que el transitorio de corriente es mayor al realizar el levante en vacío ya que sobre exige la máquina por sobre la nominal en un periodo de tiempo mucho menor que cuando se realiza con carga. En conclusión falla se produce específicamente cuando se opera con una gran cantidad de equipos reefer (se asume como carga estática) junto con el izaje de las seis grúas STS con spreader en vacío, poca carga y con carga. Todo esto debido al control directo del torque y la gran aceleración que este ejerce sobre el motor para lograr velocidades de desplazamiento de 180 [m/s].

También se puede decir que se pudo recabar la información necesaria para definir la causa de la activación de la protección 52-G, con lo cual ya se pudo sentar las bases para realizar el desarrollo y planificar una alternativa de solución al problema propuesto al comienzo del ramo de Seminario de Proyecto durante el segundo semestre del año 2016. Con todo lo anteriormente mencionado se pudo visualizar una solución al problema en la cual se pudiera considerar utilizar un PLC maestro, el cual controle y realice mediciones de corriente para efectuar el accionamiento de las grúas de manera secuencial cuando estas realicen la acción de levante de carga.

Luego de haber realizado este informe se han podido entregar los resultados de la simulación del algoritmo de control y simulaciones preliminares de las máquinas con control directo del torque. Se puede observar que en una primera instancia, resulta factible realizar el desfase en la partida de las grúas para reducir las puntas de corriente. Teniendo esto en consideración, se pudo establecer las directrices que guiaran el diseño del modelo de operación. Se consideró principalmente que el programa simulado debe habilitar o bloquear el accionamiento de las grúas y el peor caso de operación, es decir, no pueden partir dos o más grúas simultáneamente. Se debe destacar que el programa simulado se realizó pensando en incluir mejoras y realizar modificaciones para que pueda funcionar en cualquier caso según sea requerido, todo esto diseñado de manera sencilla y utilizando principalmente operadores lógicos y aritméticos para poder replicar en cualquier otro lenguaje de programación.

En conclusión para este informe se puede decir que se logró crear un algoritmo de secuenciado de grúas siguiendo una lista de prioridad pre establecida el cual opera de manera íntegra y estable. Además fue probado para múltiples escenarios además de los mostrados en este informe. Solamente falta adicionar al programa un bloque o rutina que permita almacenar datos de solicitudes en cola con la finalidad de priorizar la máquina que ingresa primero su solicitud de accionamiento por sobre la lista de prioridad. Además se establece una lista de prioridad establecida que opera debido a la estructura del programa solamente utilizando los ciclos “if” y “elseif” con lo que se establece una prioridad en el accionamiento ante partidas simultáneas el cual va de menor a mayor y en el caso de que las solicitudes no sean simultáneas, el orden queda establecido por el orden de lectura de la cola. Si bien la situación de que el accionamiento sea simultáneo es muy bajo el modelo debe considerarlo y ser diseñado para operar frente al peor de los casos.

También, en este informe final se pudo cumplir con el objetivo propuesto al comienzo de este proyecto, “Diseñar un modelo de operación para un sistema multigrúa” ya que se realizaron pruebas y se diseñó completamente el modelo para distintos escenarios y finalmente se comprobó su efectividad probándolo ante las mismas condiciones que cuando se produjo la contingencia en el terminal portuario STI. Mediante estas simulaciones también se puede apreciar que existe una reducción significativa en los transitorios de corriente con lo que se evitaría la operación de la protección de alimentador de media tensión.

Del mismo modo se debe decir que se pudo cumplir con los objetivos específicos entre los cuales se encuentra el estudiar la operación de un sistema de grúas portuarias, estudiar la estructura energética de maniobras en un ciclo de trabajo del equipo, estudiar la relación temporal de las maniobras y minimización energética, modelar las maniobras y evaluar demanda de energía en un ciclo de operación compatibilizar diferentes maniobras, optimizando tiempos de operación y demanda de energía y proponer modalidad de desfase de maniobras, con objeto de reducir puntas de demanda en sistema de suministro y diagrama de flujo de la solución. También se cumplieron con los alcances definidos en la realización de este proyecto que son diseñar algoritmo de control para optimizar la operación de un sistema multigrúa de manera de reducir

las puntas de consumo, realizar simulación en software Matlab Simulink verificando que se cumpla el algoritmo de control planteado, factibilidad de implementar en otros lenguajes de programación para su implementación real. Esto último fue necesario para delimitar la extensión del proyecto principalmente debido al tiempo que se tiene para desarrollarlo ya que hubiera sido lo ideal haber podido realizar algún sistema real para poder realizar el control de máquinas eléctricas.

Se debe destacar que el modelo fue diseñado de la manera más sencilla posible pensado en su posible implementación en PLC u otros equipos de control y en una variedad de lenguajes tanto escritos como ladder que es muy comúnmente utilizado en estos equipos de control. Se espera que a futuro se pueda continuar con este proyecto y realizar maqueta o sistema real para poder realizar pruebas del modelo de operación propuesto en este informe.

Finalmente se debe destacar que si bien este proyecto surge de una necesidad específica de la empresa STI, se puede escalar esta idea y buscar aplicaciones en otro tipo de aplicaciones en donde se utilicen máquinas eléctricas que tienen ciclos de trabajo similares a los expuestos en este informe, es decir grandes transitorios en la partida y luego un régimen estacionario a corriente nominal. Debido a esto es que se puede pensar a futuro que modelos similares pueden ser utilizados en industria y minería para automatizar los sistemas y evitar que por mala operación humana se produzcan fallas o accionamiento de protecciones indeseadas.

Bibliografía

- [1] P. S. Antonio, «<http://www.sanantonioport.cc.cl>,» [En línea].
- [2] Puerto San Antonio, [En línea]. Available: <http://www.sanantonioport.cc.cl>.
- [3] D. F. Pérez, Ingeniería técnica naval especializada en propulsión y servicios del barco, 2009.
- [4] A. Thompson, «MODELAMIENTO, SIMULACIÓN Y ANALISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LAS INSTALACIONES DE SAN ANTONIO TERMINAL INTERNACIONAL,» 2015.
- [5] D. J. CALVIÑO, *INNOVACION Y SOLUCIONES PARA GRÚAS Y SISTEMAS DE ELEVACIÓN*, 2007.
- [6] T. King, «<http://www.thermoking.com/global/en.html>,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 26 Septiembre 2016].

A Esquemático grúa STS

A.1 Diagrama unilineal de grúa STS

En la figura A-1 se muestra el diagrama unilineal de una grúa STS común. En esta se pueden observar los diversos motores que esta posee junto a los drivers de control, también se puede observar que posee un bus de corriente continua lo que resulta muy importante ya que se sabe que los drivers de los motores principales son regenerativos por lo que cuando estos se encuentran frenando pueden aportar corriente mediante este bus a los demás motores que requieran accionarse.

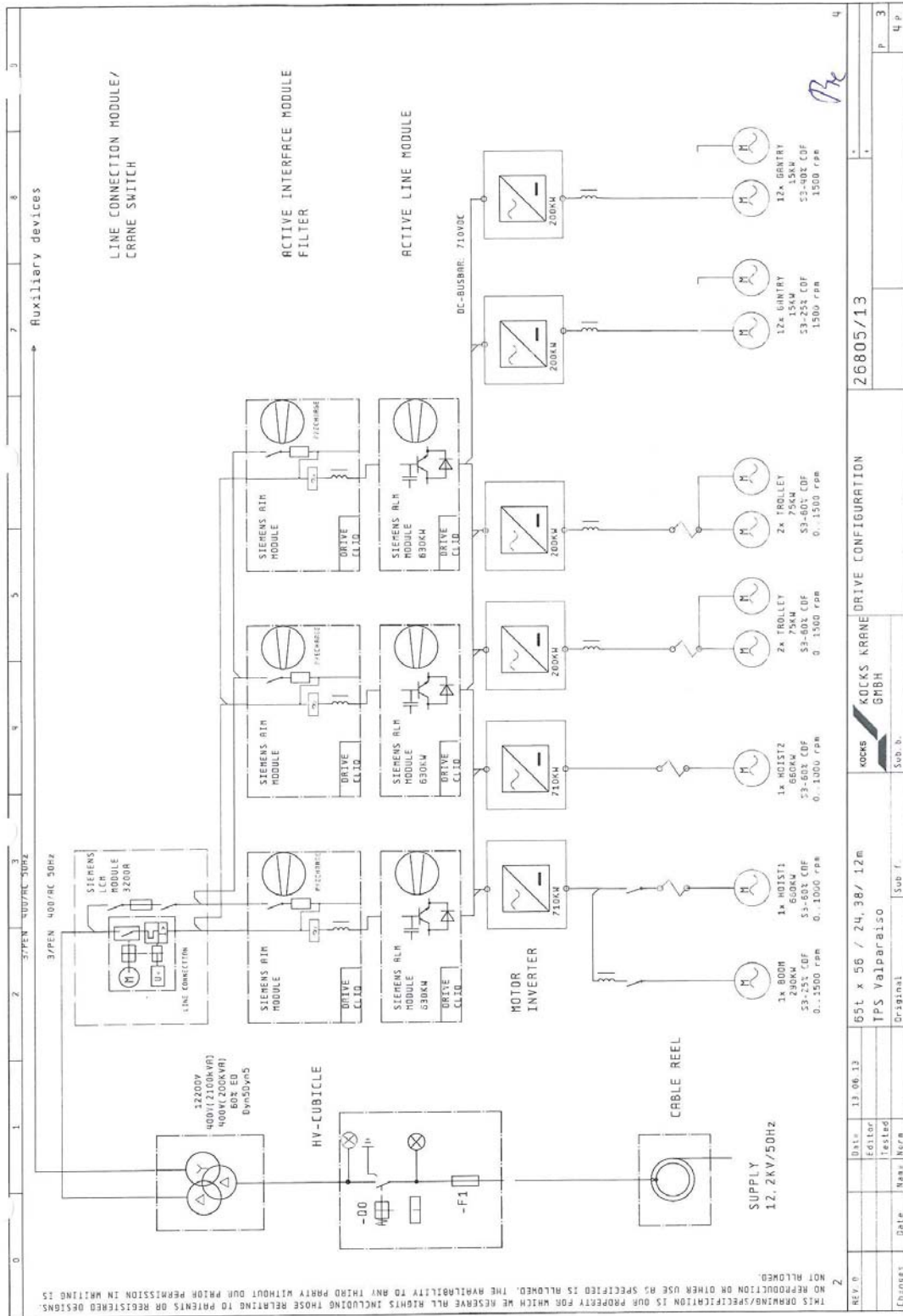


Figura A-1: Diagrama eléctrico unilínea de una grúa STS.

B Control directo del torque

B.1 Introducción.

Debido a su robustez, las máquinas de inducción son en la actualidad uno de los elementos más importantes en los accionamientos eléctricos modernos. Inicialmente se desarrollaron los métodos escalares (relación entre voltaje y frecuencia) para controlar estas máquinas. La respuesta transitoria obtenida con ellos es pobre, o sea insatisfactoria, debido a que este control no regula separadamente y adecuadamente tanto el flujo como el par del motor. Por este motivo, no es aconsejable el empleo de los métodos de control escalar en los accionamientos a los que se les exige elevadas prestaciones dinámicas.

También llamado DTC por sus iniciales en inglés. Como su nombre lo indica, se fundamenta en el control del par electromagnético de la máquina y del flujo en el estator, a través de la selección del vector espacial de voltaje más apropiado para un puente inversor. La información de activación de las componentes del inversor para cada vector espacial de voltaje está contenida en una tabla de activación.

B.2 Principio de operación.

La idea básica del DTC es calcular los valores instantáneos del par y del flujo a partir de las variables del estator de la máquina. El par y el flujo se controlan directamente y de forma independiente mediante la selección óptima de los estados de conmutación del inversor y limitando los errores del flujo y del par mediante controladores histéresis del flujo y del par.

El par del motor se controla con la rotación del vector del flujo del estator utilizando estados de conmutación adecuados. En el mismo tiempo se controla la magnitud del vector del flujo de estator de la misma manera, es decir, con la utilización de estado de conmutación del inversor.

En la figura B-1 se muestra el diagrama de bloque básico del DTC. Según esta, los valores calculados del par y del flujo se comparan con lo registrado. Los errores entran en los controladores de histéresis. Sus salidas son señales lógicas de valores discretos -1,1,0 que se aplican a la tabla de conmutación que elige uno de los ocho estados posibles del vector espacial de la tensión del inversor.

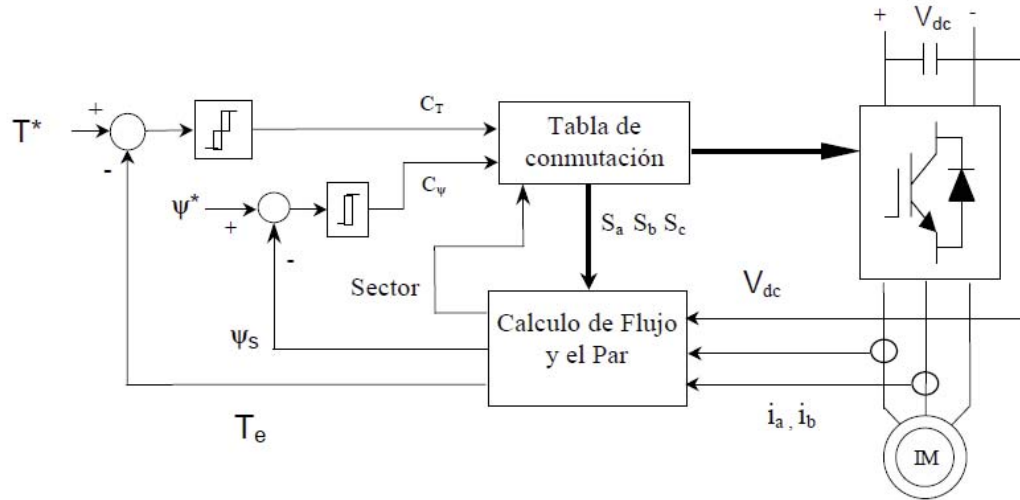


Figura apéndice B-1: Diagrama de bloques de sistema CDT.

En la figura B-2 se muestra el efecto de cada vector de la tensión sobre la magnitud y el ángulo del vector del flujo de estator si está situado en sector 1. Además, la variación del ángulo del flujo afecta fuertemente la magnitud del par, ya que el par viene dado por el producto vectorial entre el flujo del estator y el flujo del rotor. El flujo del rotor cambia lentamente por lo que cualquier variación rápida en el vector del flujo del estator producirá una variación significativa en el torque.

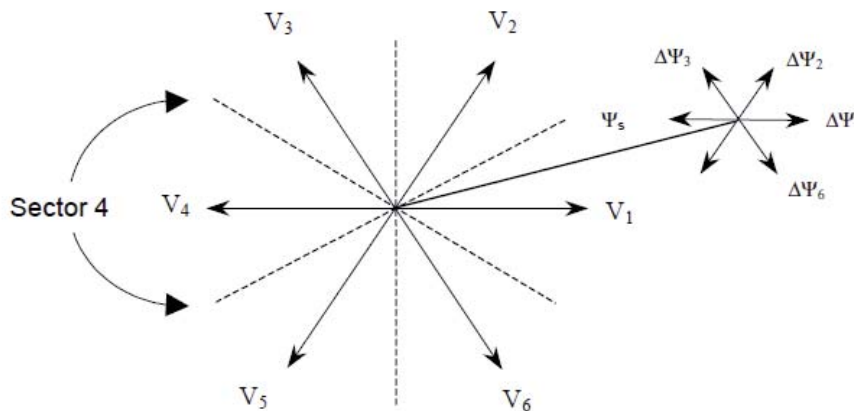


Figura apéndice B-2: Variación del flujo.