

**Universidad Católica Santa María**

**Facultad De Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**

**Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**



**MODELAMIENTO Y DISEÑO DE UN CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL  
CON SUPERCAPACITOR EN APLICACIONES CON GENERADOR ELÉCTRICO  
DE VELOCIDAD VARIABLE**

**Tesis presentada por el bachiller  
Pacheco Zea Mauricio Omar**

**Para optar por el Título Profesional  
de Ingeniero Electrónico**

**Asesor: Ing. Esquivel Zenteno Eduardo**

**Arequipa – Perú**

**2018**

FOLIO 12

ACTA DE TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

En Arequipa, a los 21 días del mes de Septiembre del año 2015, siendo las 10:30 horas, en el local de la Universidad Católica de Santa María, se reunió el JURADO EVALUADOR conformado por los señores docentes

PRESIDENTE: ... VOCAL ... SECRETARIO: ... para recibir las previas orales del (la/los) señor (ita/es) Bachiller(es):

MQu... o Omcr Pac.l--e.c.o (3a.c;

quien(es) pretende(n) optar el Título Profesional de INGENIERO ELECTRÓNICO, sustentando la(el) ... titulada(o) ...

El Presidente del Jurado invitó al(la/los) Graduando(a)s a exponer su trabajo. Luego los Miembros del Jurado formularon las preguntas correspondientes. Finalmente, deliberaron y emitieron su dictamen, siendo el resultado el siguiente:

.....t:7r... .Cj...F...-...?r...?r... f...-.../ t...; f'k ... f' ...

Siendo las .....!-p... horas se dio por concluido el acto y firmaron:

Handwritten signatures and names for PRESIDENTE, SECRETARIO, and VOCAL, along with the name of the TITULANDO.

## PRESENTACIÓN

El presente trabajo de tesis ha sido desarrollado tomando en cuenta la teoría de convertidores, principio de funcionamiento del freno dinámico y de diferentes métodos matemáticos en especial la discretización directa que fue fundamental para representar el control PID en el PLC, el cual el programa fue desarrollo en lógica de instrucción. Es también importante recalcar que tanto la función de transferencia del motor diesel como del generador han sido encontrados usando data real del mismo equipo en el momento de una alta demanda, es decir, cuando está moviendo un contenedor de alrededor de 20 toneladas, de esta forma permitió sintonizar perfectamente el controlador PID, adicionalmente al controlador PID se la añadió un filtro en la parte derivativa. Teniendo ya desarrollado el nuevo control de demanda de potencia de la RTG, se prosiguió a desarrollar el sistema híbrido, donde se representó el comportamiento del convertidor bidireccional con los ultracapacitores usando Matlab para simular el comportamiento del sistema híbrido con el sistema de combustión, dando como resultado una referencia bastante cercana a la realidad. Finalmente se realiza una comparación de los tres sistemas que son el control de demanda de potencia original desarrollado por el OEM del equipo, el nuevo control de demanda de potencia PID y finalmente la simulación del sistema híbrido, dando como resultado un importante ahorro de combustible.



## DEDICATORIA

*A mi Madre querida, a quien recuerdo en todo momento y me dio todo el apoyo, motivación, fuerza y amor que un hijo puede recibir. A mi Padre que hubiera deseado estar a su lado por unos años más.*

*A mi hermana Eliana y a mi esposa Patricia por cada momento de apoyo y paciencia que tuvieron conmigo.*

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por tener compasión de mí y estar en todo momento tanto en los momentos difíciles como los felices, a mi esposa Patricia, a mi hermana Eliana por su paciencia, motivación y apoyo. Y un agradecimiento especial al Ingeniero Eduardo Esquivel por los consejos, dirección y paciencia para el desarrollo de este proyecto de tesis.

## INTRODUCCIÓN

Millones de contenedores son transportados en todo el mundo, lo que hace más de 200 millones de viajes cada año entre los puertos con terminales de contenedores, como el Puerto del Callao. El Manejo confiable y eficiente de estos contenedores es crucial, ya que la competencia entre terminales de contenedores es muy dura. Dentro de un terminal, hay un conjunto de tipos de equipos importantes, en primer lugar, están los (STS) grúas buque-tierra, que tienen que cargar o descargar barcos de contenedores lo más rápido posible, por lo general con múltiples grúas que trabajan en una sola nave. Los contenedores tienen entonces que ser transportados de forma "horizontal" para el patio de apilado detrás de las grúas STS. Esto se hace en vehículos mucho más pequeños, como los tractores de contenedores, vehículos guiados automáticamente (AGV) o straddle. Por último, los contenedores se apilan para el uso más eficiente del espacio y tiempo de movilización. Como parte del trabajo del área de mantenimiento, es hacer más eficientes los equipos, haciendo mejoras en el funcionamiento para hacerlos más rápidos y más seguros, En este trabajo de investigación, se ha propuesto una mejora en el funcionamiento del equipo RTG o pórtico de ruedas de caucho, para hacerlo más eficientes, es decir, que mueva la misma cantidad de contenedores en una hora, pero con el menor gasto operativo, que en este caso es con menos combustible. El proyecto tendrá dos fases de desarrollo y serán secuenciales, primero se mejorará el control de demanda de potencia del motor diesel, y luego se implementará un sistema híbrido compuesto de un convertidor bidireccional de corriente continua con Ultracapacitores, donde la energía que se quema cuando el contenedor es desplazado hacia abajo, será capturada y luego entregada al sistema, donde el motor diesel permanecerá con un consumo de combustible constante en relenti, y de esa forma se ahorrará combustible por cada movimiento que realice el equipo.

## RESUMEN

El presente proyecto de tesis desarrolla el modelamiento y diseño de un convertidor bidireccional con supercapacitor en aplicaciones con generador eléctrico de velocidad variable, este diseño permitirá que la energía de regeneración proveniente del motor de inducción principal de elevación cuando el contenedor es transportado hacia abajo, cargue los supercapacitores a través del convertidor bidireccional, que se comportara en modo buck, luego en el siguiente ciclo de operación del equipo, es decir, cuando el contenedor es izado o cuando el spreader se traslada hacia arriba, esta energía almacenada se descargara, cambiando el modo de operación del convertidor a modo boost, alimentando el bus DC, esta energía será aprovechada por el inversor de elevación o de hoist haciendo posible el movimiento hacia arriba.

La energía almacenada se ira descargando, reduciendo la potencia neta, en ese momento la energía será que necesita el motor de hoist será compensado por el generador diésel, reduciendo así el consumo de combustible que es el objetivo principal de este proyecto. En el desarrollo del proyecto, se ha visto por conveniente ejecutarlo en dos fases, la primera en mejorar el lazo de control de demanda de potencia, el cual, el actual control es un control PI a un controlador PID con filtro en la parte derivativa con dos etapas, la segunda fase el diseño del convertidor bidireccional simulado en Matlab.

La implementación de la primera fase se ha realizado en el equipo, recolectando la suficiente data para poder generar indicadores de litros / movimiento, que son comparados con la simulación del convertidor bidireccional para así determinar el porcentaje de ahorro entre las mejoras, dando resultados muy interesantes y que dan un retorno de inversión la segunda fase es implementada en el equipo

Palabras claves: Convertidor, Controlador PID, Ultracapacitores, Regeneración

## ABSTRACT

The following thesis project develops the modeling and design of a bidirectional converter with supercapacitor in applications with variable speed electric generator, this design will allow the regeneration energy coming from the main induction motor of elevation when the container is transported down, load The supercapacitors through the bidirectional converter, which behaves in buck mode, then in the next cycle of operation of the equipment. when the container is hoisted or when the spreader is moved upwards, this stored energy is discharged, Mode of operation of the converter in boost mode, powering the DC bus, this power will be taken advantage of by the hoist or hoist inverter making the upward movement possible. The stored energy will be discharged, reducing the net power, at that time the energy will need that the hoist engine will be compensated by the diesel generator, thus reducing the fuel consumption which is the main objective of this project. In the development of the project, it has been considered convenient to implement it in two phases, the first in improving the power demand control loop, which, the current control is a PI control to a PID controller with filter in the derivative part with Two stages, the second phase the design of the simulated bidirectional converter in Matlab. The implementation of the first phase has been carried out in the equipment, collecting enough data to be able to generate liters / movement indicators, which are compared with the bidirectional converter simulation to determine the percentage of savings between the improvements, giving very interesting results and that give a return of investment the second phase is implemented in the equipment.

Key words: Converter, PID controller, Ultracapacitors, Regeneration.

## INDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	III
INTRODUCCIÓN.....	VI
ABSTRACT .....	VIII
INDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE FIGURAS .....	XIII
INDICE DE CUADROS .....	XVI
INDICE DE DIAGRAMAS .....	XVIII
INDICE DE GRAFICAS.....	XX
INDICE DE PROGRAMAS.....	XXV
CAPITULO.....	1
I. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA.....	3
1.3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA .....	6
1.4. ALCANCES.....	13
1.5. OBJETIVOS.....	15
CAPITULO .....	16
II. MARCO TEORICO .....	16
2.1. MOTOR GENERADOR ELECTRICO. ....	17
2.2. FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DICRETOS .....	19
2.3. ALGORITMO PID MODIFICADO [7].....	25
2.4. ANALISIS Y CALCULO DE PERDIDAS EN EL IGBT [12].....	28
CAPITULO .....	33

III.	MODELAMIENTO DEL MOTOR DIESEL.....	33
1.1.	ESQUEMA GENERAL DEL MODELO .....	34
	CAPITULO .....	38
IV.	TRATAMIENTO DE LAS VARIABLES A MONITOREAR Y REGISTRAR .....	38
4.1.	ANTECEDENTES .....	39
4.2.	TRATAMIENTO DE LA SENAL DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA.....	40
4.3.	CALCULO DE VARIALES DE POTENCIA DEL MOTOR DIESEL .....	44
4.4.	CALCULO DE LA VARIABLES DE ENERGIA REGENERATIVA.....	46
4.5.	VARIABLES RECONOCIDAS POR LOS DIFERENTES VARIADORES PARA MONITOREO Y REGISTRO.....	53
4.6.	ANALISIS DEL CONTROL VELOCIDAD – TORQUE MOTOR DIESEL .....	55
4.7.	EXPORTACION DE LOS DATOS OBTENIDOS A MATLAB. ....	57
4.8.	REPRESENTACION DE LAS CURVAS DE POTENCIA Y DEMANDA DEL MOTOR DIESEL EN FUNCIONES MATEMATICAS.....	61
	CAPITULO .....	67
V.	MODELAMIENTO DEL MOTOR DIESEL POR IDENTIFICACION DE SISTEMA....	67
5.1.	ANTECEDENTES .....	68
5.2.	FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA RESPUESTA DEL MOTOR.....	73
5.3.	FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA INERCIA Y EL COEFICIENTE DE FRICCION. 76	
5.4.	CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CONTROLADOR PID. ....	79
	CAPITULO .....	82
VI.	DISEÑO DEL ALGORITMO PID DISCRETO MODIFICADO. ....	82
6.1.	ALGORITMO PID DISCRETO.....	83
6.2.	SIMULACION DEL SISTEMA DEL CONTROLADOR PID MODIFICADO.....	86
6.3.	MEJORAS DEL CONTROLADOR PID POR INCONSISTENCIAS (EN SITUACION DE LIMITES) DURANTE LA SIMULACION). ....	94
6.4.	COMPRACION DEL MODELO.....	95
	CAPITULO .....	97
VII.	ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS DEL EQUIPO EN FUNCIONAMIENTO. 97	
7.1.	ANTECEDENTES .....	98

7.2.	MEDICION DE LA ENERGIA REGENERATIVA EN VACIO .....	98
7.3.	CORROBORACION DE CALCULO DE ENERGIA. ....	100
7.4.	MEDICION DE LA ENERGIA RECIBIDA (ENERGIA REGENERATIVA) CON CARGA 102	
7.5.	CUADRO COMPARATIVO DE ENERGIA.....	104
7.6.	ANALISIS DEL COMSUMO DE COMBUSTIBLE.....	104
CAPITULO .....		109
VIII. SIMULACION Y PRUEBAS DEL SISTEMA DEL CONTROLADOR PID MODIFICADO 109		
8.1.	ANTECEDENTES .....	110
8.2.	SIMULACION USANDO PLC DEL EQUIPO. ....	115
8.3.	PRUEBAS REALES DEL NUEVO CONTROLADOR EN EL EQUIPO.....	126
8.4.	PROGRAMA DE PLC.....	128
8.5.	PROPUESTA DE MEJORA DEL CONTROLADOR PID MODIFICADO .....	133
8.6.	COMPARACION DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ENTRE CONTROL ACTUAL Y EL PROPUESTO .....	135
CAPITULO .....		143
IX. MODELAMIENTO DEL CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL DC/DC .....		
9.1.	ANTECEDENTES .....	144
9.2.	CONSIDERACIONES PREVIAS.....	145
9.3.	ULTRACAPACITORES (ENERGY BUFFER). ....	151
9.4.	DISEÑO CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL CC/CC .....	156
9.5.	ANALISIS EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CONVERTIDOR .....	163
9.6.	ANÁLISIS EN ESTADO ESTACIONARIO DEL CONVERTIDOR DIRECCIONAL EN MODO BOOST (Elevador).....	177
9.7.	DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE ULTRACAPACITORES. ....	183
9.8.	SIMULACIONES.....	194
9.9.	SIMULACION Y ESTIMACION DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE USANDO LOS ULTRACAPACITORES. ....	207
9.10.	ESTIMACION DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN OPERACIÓN DEL EQUIPO	237
9.11.	ESTIMACION DEL CONSUMO DE DIESEL DE LA RTG (litros/Hora promedio al mes).	239
X.	OBSERVACIONES.....	243

XI. CONCLUSIONES.....	244
BIBLIOGRAFIA .....	246



## INDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Puerto del Callao – Dpworld.....	3
Figura. I.2 RTG.....	4
Figura. I.3 Arquitectura de control de la RTG. ....	5
Figura. II.1 Respuesta en frecuencia del teorema del muestreo .....	22
Figura. II.2 (a). Discretización cuadrática (b). Discretización trapezoidal .....	23
Figura. III.1 Esquema del generador diésel.....	34
Figura. IV.1 Esquema General de los convertidores e inversores de la RTG. ....	41
Figura. IV.2 Datos que comparte el PLC con el variador.....	42
Figura. IV.3 Direccionamiento de las variarees producidas por el PLC.....	48
Figura. IV.4 Archivos de los diferentes inversores donde están direccionados las variables.....	49
Figura. IV.5 Escalamiento de las variables del sistemas hacia los drives. ....	50
Figura. IV.6 I/O archivo de cada variador.....	51
Figura. IV.7 Direcciones disponibles en los drives.....	52
Figura. V.1 Aplicación "system identification".....	69
Figura. V.2 Importar data, time domain. ....	69
Figura. V.3 Seleccionar entrada y salida a tratar.....	70
Figura. V.4 Estimar "transfer function models".....	71
Figura. V.5 Parámetros de la función de transferencia modelada.....	72
Figura. V.6 Comparación de los modelos de función de transferencia realizados. ...	72

Figura. V.7 Función de transferencia de la respuesta del motor. ....	74
Figura. V.8 Modelo estimado para la F.T. de la respuesta del motor diésel. ....	77
Figura. V.9 Parámetros de la función de transferencia del controlador PID. ....	80
Figura. VI.1 Importación del registro de variables. ....	88
Figura. VIII.1 Representación de los movimientos del equipo RTG. ....	112
Figura. VIII.2 Estructura de los programas creador en el PLC. ....	116
Figura. VIII.3 Distribución de bloques de programación en el PLC. ....	127
Figura. VIII.4 Representación gráfica de la operación de la grúa RTG. ....	136
Figura. IX.1 Periodo de conmutación a la salida. ....	145
Figura. IX.2 Ciclo de trabajo. ....	146
Figura. IX.3 Esquema de conmutación PWM.....	148
Figura. IX.4 Esquema de control de PWM.....	149
Figura. IX.5 Señal portadora triangular.....	150
Figura. IX.6 Modulación por ancho de pulso. ....	150
Figura. IX.7 Principio de operación de un Ultracapacitor.....	151
Figura. IX.8 circuito equivalente de UC (a) Modelo RC (b) Modelo dinámico de primer orden. ....	154
Figura. IX.9 Circuito equivalente del UC usando el modelo de Maxwell BMOD0063 P125 B08. ....	154
Figura. IX.10 Diagrama de bloques de convertidor bidireccional.....	157
Figura. IX.11 Convertidor Reductor- Elevador.....	158
Figura. IX.12 Modo Buck T1 cerrado.....	160
Figura. IX.13 modo Buck T1 abierto. ....	160

Figura. IX.14 Modo Boost T2 cerrado.....	161
Figura. IX.15 Convertidor modo elevador T2 apagado.....	162
Figura. IX.16 Modos de operación del convertidor Bidireccional CD-CD. ....	163
Figura. IX.17 Convertidor modo Buck.....	164
Figura. IX.18 Modelo para el Condensador incluyendo el equivalente Resistencia en serie (ESR). .....	177
Figura. IX.19 Circuito equivalente para el Convertidor Elevador (Boost).....	178
Figura. IX.20 Grafica del perfil de descarga del ultracapacitor.....	186
Figura. IX.21 Distribución de la resistencia de equalización.....	192
Figura. IX.22 Representación de los límites del convertidor Siemens.....	207
Figura. IX.23 Representación de los movimientos para la simulación.....	215
Figura. IX.24 Resumen de cajas.....	233