

## Sustitución de un sistema Ward-Leonard por un convertidor estático en un pique minero

Wilfredo Ziehlmann O. Luis Andrés Donoso N.  
Departamento de Electricidad - Facultad de Ingeniería  
Universidad de Santiago de Chile

### RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo dar a conocer el desarrollo del estudio realizado para la sustitución de un sistema Ward-Leonard, encargado de controlar la velocidad de un motor de corriente continua que, acciona un huinche (elevador) al interior de un pique minero. El reemplazo se llevará a efecto mediante un convertidor estático controlado A.C./D.C. a base de tiristores.

### INTRODUCCIÓN

El progreso tecnológico ha permitido disponer de sofisticados equipos para controlar diversas variables en los accionamientos de corriente continua. Al comienzo, para obtener velocidad variable se utilizaron los relés electromagnéticos con pasos discretos de aceleración, luego vinieron los grupos motor-generador (Ward-Leonard) con amplidinas y amplistast. Hoy existen conversores estáticos que permiten controlar la variable que se desee en un accionamiento de corriente continua, acompañado de un sistema de regulación adecuado.

En la actualidad es impensable una máquina moderna sin accionamiento de velocidad controladas por conversores estáticos.

### SITUACIÓN ACTUAL

El accionamiento del huinche del pique "C" del mineral de cobre El Teniente, CODELCO Chile, actualmente es realizado por un grupo conformado por: motor de corriente alterna, generador de corriente continua y motor de corriente continua. Se trata de una cascada de equipos cuya alimentación está tomada desde la red en 2400V A.C., 3 fases y 60 Hz.

### CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO WARD-LEONARD

#### Motor de corriente alterna.

Corresponde a un motor de inducción de rotor

bobinado.

Marca	:	Westinghouse.
HP	:	600
Fases	:	3
Ciclos	:	60
Elevación de temperatura	:	60°C
Volts	:	2300
Amps.	:	132
RPM	:	1190

#### Generador de corriente continua.

Marca	:	Westinghouse
Volts	:	700
Amps.	:	685
RPM	:	1200
Elevación de temperatura	:	60°C
Enrollado	:	Compound
Amp. Campo Shunt	:	35,7
Ohms Campo Shunt	:	1,20

#### Motor de corriente continua.

Es el motor principal respecto del movimiento del huinche. Trabaja con tensiones desde 0 a 700 volts, su velocidad varía desde 0 a 500 r.p.m.. Se alimenta a través del generador de corriente continua. Sus características son:

Marca	:	Westinghouse
HP	:	600
Volts	:	700
Amps.	:	680
RPM	:	500
Elevación de temperatura	:	40°C
Enrollado	:	Shunt

6

Fac. Ing. Eléctrica

**Notación:**

$V_R$	:	Señal de referencia.
$V_T$	:	Tensión entregada por el generador tacométrico.
$V_i$	:	Tensión de entrada al módulo $\sqrt{V_R - V_T}$ .
$V_S$	:	Tensión de salida del módulo.
$R_g^f, L_g^f$	:	Campo inductor del generador.
$i_g^f$	:	Corriente del campo del generador.
$V_a$	:	Tensión en el anillo principal de c. c.
$I_a$	:	Corriente de inducido o armadura del anillo.
$i_m^f$	:	Corriente de campo del motor (constante).
$V_m^f$	:	Tensión de campo del motor.
$\omega_g^f$	:	Velocidad angular del generador (1200 r.p.m.).
$\omega_m^f$	:	Velocidad angular del motor, variable de acuerdo a la tensión entregada por el generador. Rango de variación entre 0 y 500 r.p.m.
Carga	:	Tambor del huinche.
Taq	:	Generador tacométrico (transductor), cierra el lazo de alimentación.
Módulos	:	Sistema de control.

**MODOS DE OPERACIÓN.**

El huinche posee cuatro modos de operación, a saber:

- Inspección.
- Manual.
- Semi automático.
- Carrera corta (jogging).

**Operación de inspección.**

Este modo de operación permite mover la jaula a una velocidad conveniente para la inspección del pique, contrapeso, piolas y la caja reductiva de engranajes. Esta operación está comandada tanto desde su jaula como desde su techo (inspección remota), como desde la sala de huinches (inspección local).

**Operación manual.**

Este modo de operación permite detener y mover la jaula en ambas direcciones. Su manejo sólo se puede realizar desde la sala de huinches y su operación se realiza manualmente.

**Operación semi automático.**

Es la operación que se utiliza normalmente, sólo precisa el operador de la jaula. El control se encarga de acelerar la jaula hasta mantenerla a una velocidad de 500 pie/min (2,54 m/s), luego desacelerar hasta una velocidad de 50 pie/min (0,254 m/s) cuando va llegando al nivel seleccionado y, finalmente detener la jaula. Esta operación se puede comandar tanto desde la sala de huinches (local), como de la jaula (remota).

**Operación de carrera corta (jogging).**

Es una operación propia del control semiautomático de la jaula. La velocidad que le imprime a esta es de 25 pie/min (0,127 m/s) y se usa para dejar la jaula a la altura de nivel.

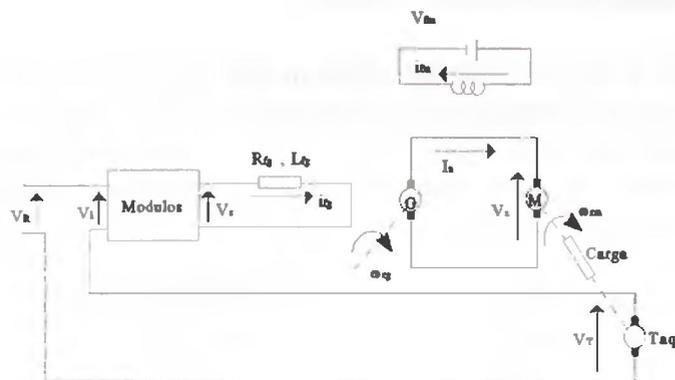


Figura 1  
Sistema Ward-Leonard actual

### Sistema de control.

El sistema de control está basado en varios sensores: nivel por estación, subsistema (freno de tambor), puertas de jaula, generadores de velocidad, tacómetros, reguladores de velocidad mecánicos (Lilly Controller), switches operados por levas, etc. Las señales de estos sensores alimentan una lógica de relés y controladores electrónicos. Estos últimos actúan sobre el circuito de potencia controlado la velocidad de la jaula, operación de frenos, alarmas, posicionamiento de la jaula, etc.

### FUNDAMENTOS PARA LA MODERNIZACIÓN DEL PIQUE MINERO.

El huinche del pique fue instalado a principios de la década del '70. Sin embargo, la creciente tasa de fallas, la obsolescencia de repuestos, la gran cantidad de mano de obra tanto en operación como en mantención, etc., recomiendan la modernización en la generación de la corriente continua.

Con la instalación de un convertidor estático que sustituirá el grupo motor-generador se lograrán considerables ventajas.

- Bajo costo en mantenimiento.
- Adaptación óptima de la velocidad a las necesidades de la máquina.
- Accionar y frenar en ambos sentidos.
- Baja necesidad de repuestos y alta intercambiabilidad entre ellos.
- Posibilidad de construcción modular incluyendo la parte potencia, reguladores y mando, permitiendo solucionar en forma rápida fallas durante la operación.
- Manejo sencillo y gran confiabilidad.
- Posibilidad de frenar con regeneración de energía.
- Flexibilidad, si un tiristor falla, el equipo puede seguir operando aunque con exigencia algo más elevada.

- Mejor rendimiento, especialmente con carga parcial.
- Disponibles en poco tiempo sin necesidad de complicados procesos de arranque y permite variar el flujo de energía con rapidez arbitraria.

### Criterios técnicos de elección de un convertidor.

Elementos que se deben considerar para la elección de un convertidor.

- Naturaleza de la fuente de alimentación.
- Potencia del motor.
- Armónicos inyectados a la línea.
- Ondulación de la corriente del motor (ripple).
- Inversión de marcha.
- Frenado.

### Fuente de alimentación, potencia del motor y prestaciones del sistema.

El conversor será alimentado desde la red en 700V A.C. con una frecuencia de 60 ciclos por segundo. Al motor que se le suministrará energía, es de corriente continua de excitación separada, devanado shunt, 600 HP, 700 volts, 680 amperes. Se encuentra actualmente en servicio funcionando con un controlador de tipo Ward-Leonard.

El convertidor a instalar entregará alimentación a un motor de c.c. que acciona el huinche del pique. Este realiza diversas tareas tales como: trasladar personas en los cambios de turnos, movimiento de mineral, acarreo de diversos materiales de apoyo (herramientas, cemento, etc.), se le considera como una instalación estratégica.

### Armónicos inyectados a la línea.

Durante el proceso de rectificación y/o inversión se producen armónicos como función de la frecuencia de potencia tanto en el extremo de alterna como en el de continua del conversor.

### Supresión de transitorios de tensión.

En los primeros años de su desarrollo se hacía resaltar la sensibilidad de los semiconductores a condiciones de sobretensión, sus reducidas tensiones límites en aquellos días acentuaban esta característica al compararlos con tubos de vacío. Sin embargo, ahora este problema ha sido superado y se producen semiconductores que pueden soportar tensiones de pico de varios miles de voltios. No obstante, todavía es necesario proteger a los tiristores contra transitorios, porque, el transitorio puede tener aumento de tensión  $dv/dt$  lo suficientemente rápido para producir el cebado del tiristor.

Algunos tiristores se dañan fácilmente por transitorios de tensión de baja energía superiores a su valor límite de tensión de pico; otros (los de tipo avalancha) pueden disipar cantidades relativamente grandes de energía transitoria en condiciones de bloqueo sin graves perjuicios y, por último, otros (de tipo bidireccionales) pueden pasar al estado de conducción sin autodestruirse por un exceso de tensión. Todos requieren algún tipo de supresión de transitorios, la clase e importancia de esta supresión varía en cada caso particular.

### Fuentes de transitorios de tensión.

Los transitorios que afectan los circuitos con tiristor pueden tener tres orígenes distintos:

- i) La red de alimentación.
- ii) Los interruptores de red y de carga (apertura y cierre).
- iii) El circuito de rectificación y carga (conmutación).

### Sistema de regulación y control propuesto.

A diferencia del sistema Ward-Leonard, cuya respuesta es lenta, un sistema que cuente con elementos estáticos de estado sólido, tiene una rápida respuesta, en consecuencia los tipos de reguladores que se deben utilizar son distintos.

### Tipos de regulación según el modo de funcionamiento.

Un equipo de regulación se caracteriza por la realimentación de la señal de salida del sistema a regular y la comparación continua entre el valor de referencia y el valor real.

Según el modo de operación pueden distinguirse:

- Módulos analógicos
- Módulos digitales.
- Módulos analógicos digitales.

### Ventaja de los controles digitales sobre los controles analógicos.

Algunas de las ventajas de los controles digitales sobre los controles analógicos se resumen a continuación:

- Los controles digitales pueden realizar complejos cálculos con exactitud constante a alta velocidad.
- Las computadoras digitales pueden realizar cálculos casi hasta cualquier grado de exactitud deseado, con un incremento de costo relativamente pequeño.
- El costo de las computadoras analógicas aumenta rápidamente al aumentar la complejidad de los cálculos, si se desea mantener constante la exactitud.
- La gran versatilidad de los controles digitales permite cambiar totalmente las operaciones a realizar con el solo hecho de introducir un nuevo programa.
- El control digital puede prestar servicios recibiendo información operativa o instrucciones desde algún centro de cómputos en donde se realizarán estudios de optimización, proyectos o análisis económicos.

### Tipo de regulación escogida según su realimentación.

El sistema de regulación que más se ajusta a nuestros propósitos es un sistema de Regulación Lineal e Cascada, en donde existe un regulador individual para

cada una de las variaciones controladas. Corresponde a dos o más lazos de control realimentados conectados en serie. La referencia del controlador secundario corresponde a la variable manipulada del controlador principal. Un controlador en cascada se utiliza cuando el lazo interno responde más rápido al lazo exterior. Se debe tratar de incluir dentro del lazo interno la mayor cantidad de retardos, así como las perturbaciones más importantes que podrían actuar sobre el proceso. La regulación en cascada actúa por "saturaciones", esto es que, si el regulador está saturado un limitador a la salida de este, entregará una señal constante.

Ventajas de la regulación Lineal en Cascada:

- Un regulador por separado para cada variable permite un ajuste óptimo para cada lazo.
- Se ajustan las características estáticas y dinámicas de los diferentes lazos, partiendo del más interno.
- Se pasa fácilmente de un modo de funcionamiento a otro sin que existan golpes.
- El estudio, cálculo y puesta en marcha no presentan mayores dificultades.

- Se puede montar y probar por etapas.

**Regulador de posición.**

La señal de referencia de la posición viene dada por el control semiautomático, mientras que la referencia actual va tomada directamente desde la caja reductora de engranajes. La señal de salida será la velocidad de referencia del controlador de velocidad, según sea, la posición o nivel seleccionado, se aumentará o reducirá la velocidad de la jaula.

El lazo de realimentación del control de posición, representa el lazo más amplio del sistema, por tanto debe ser el más lento.

**Controlador de velocidad.**

La variable principal realimentada, en nuestro caso la velocidad, se regula mediante un lazo exterior. La salida del regulador de velocidad es la señal de entrada del regulador del lazo interior, en este caso un regulador de corriente.

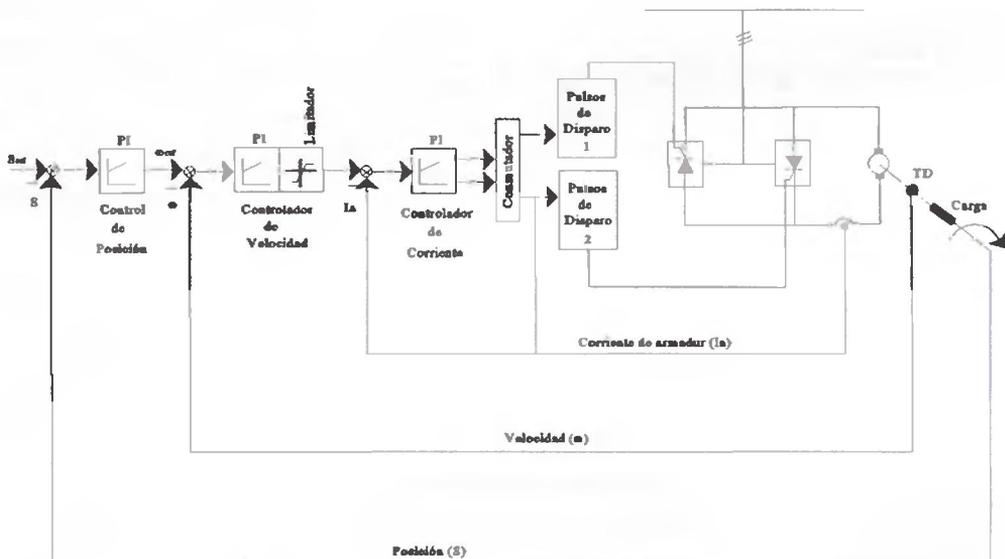


Figura 3

Esquema conversor con elementos de regulación y control

Limitando la salida del regulador de velocidad, se limita la referencia del regulador de corriente obteniéndose la característica de limitación deseada. La referencia de voltaje para la velocidad se realiza mediante un controlador. Un dinamo tacométrico (TD) proporciona un valor actual de velocidad, luego la referencia y el valor actual son comparados a la entrada del regulador de velocidad. La diferencia de estos valores, causados por aceleraciones o cambios en el valor de referencia, producen un voltaje en la salida del controlador de velocidad, este voltaje sirve como referencia para el controlador de corriente.

**Controlador de corriente.**

El controlador de corriente compara la tensión de salida del controlador de voltaje con el valor de corriente actual (muestra tomada a la salida), luego de la diferencia entre estos valores, el controlador de corriente entrega el voltaje de cociente continua que, alimenta al generador de pulsos lo que, determina la posición de los pulsos de disparo y consecuentemente el desfase del ángulo que, producirán los elementos semiconductores.

**Regulación en tiempo discreto.**

Los sistemas de tiempo discreto difieren de los de tiempo continuo, en donde las señales para un sistema discreto, aparecen en forma de datos muestreados.

Cuando se obtienen mediciones necesarias para el control en forma intermitente o cuando se comparte un control de gran envergadura entre diversas plantas, de manera que se envía una señal de control a cada planta sólo periódicamente o siempre que se utiliza una computadora para realizar los cálculos necesarios para el control, entonces, en estos casos ocurre una presentación práctica de lo que es un sistema de tiempo discreto.

**Diagrama de bloques del conjunto regulador-conversor-motor.**

De acuerdo a la figura 3 el diagrama de bloques esquemático generalizado se presenta en la figura 4 de la siguiente forma:

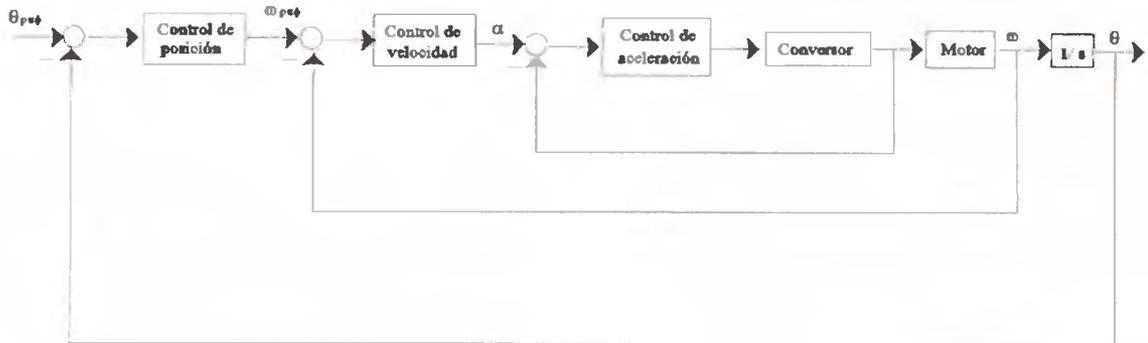


Figura 4  
Diagrama de bloques  
regulador-conversor-motor

## Conclusiones.

Los estudios realizados han permitido alcanzar valiosa información para especificar el tipo de convertidor más adecuado según los requerimientos exigidos, teniendo presente que se involucra el transporte de personas, instalación sobre los 2200 metros de altura, ambiente de alta polución y humedad, etc.

Mediante software adquirido se están realizando las pruebas de simulación correspondiente y, proveedores de la especialidad han entregado antecedentes sobre equipos que se ajustan a las especificaciones respectivas.

## Referencias.

Sugandhi, Rajendra y K. Kumar.  
Tiristores: conceptos y aplicaciones.  
México: Editorial Limusa.  
1990.

Lilen, Henri.  
Tiristores y triacs.  
Barcelona: Editorial Marcombo S.A.  
1976.

Bühler, Hansruedi.  
Electrónica industrial, regulación y control.  
Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A.  
1985.

Bühler, Hansruedi.  
Electrónica industrial, electrónica de potencia.  
Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A.  
1985.

Möltgen, Gottfried  
Convertidores estáticos  
Barcelona: Editorial Marcombo S.A.  
1986.

I Seminario IEEE, VII Seminario ACCA.  
Depto. de Electricidad, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción  
Concepción Chile.  
1988.

Leonhard, Werner.  
Control of electric drives.  
Berlin: Springer Verlag.  
Lira Alvarez, Héctor.  
Electrónica de potencia.  
Depto. de Electricidad, Facultad de Ingeniería.  
Universidad de Santiago de Chile.  
Santiago Chile.  
1981.

Bird, B. M. and K. G. King.  
An introduction to power electronics.  
Chichester: John Wiley.  
1984.

Seguier, Guy.  
Electrónica de potencia.  
Barcelona: Editorial Gustavo Gili.  
1982.

Chauprade, Robert.  
Control electrónico de motores de corriente continua.  
Barcelona: Editorial Gustavo Gili.  
1986.