

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Modernización de Reguladores de Velocidad Hidro – Mecánicos

Jorge Eduardo Mejía Castañeda

Tesis de Grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Enero de 2011

Universidad San Francisco de Quito

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Modernización de un regulador de Velocidad Hidro – Mecánico

JORGE EDUARDO MEJIA CASTAÑEDA

Laurent Sass

Director de la Tesis

Edison Bonifaz

Miembro del Comité de Tesis

Omar Aguirre

Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo

Decano del Colegio Politécnico

Quito, enero de 2011

© Derechos de autor

Jorge Eduardo Mejía Castañeda

2011

Agradecimiento

Agradezco a mis padres por todo el apoyo, paciencia, dedicación y ejemplo que me han dado durante todos los años de mi vida. A mis hermanos por estar junto a mí incondicionalmente. A mis abuelitos, tíos, primos y amigos que han aportado día a día en mi vida. A la universidad San Francisco de Quito por ser mi guía en mi formación profesional y a Turbomotores Ecuatorianos por todo permitir mi desarrollo y formación profesional.

Resumen

Este proyecto denominado “Modernización de Reguladores de velocidad Hidro – Mecánicos” explica los principios básicos de operación de los Reguladores de Velocidad Mecánicos desde su origen en 1870, las mejoras que se han ido implementando hasta llegar a los Reguladores de Velocidad Electrónicos Digitales. La empresa Woodward Governor Company ha liderado la tecnología de la regulación de velocidad a través de sus nuevas innovaciones y mejoras a los sistemas de control de velocidad. Woodward tiene departamentos capacitados en este tipo de proyectos, pero no han sido difundidos a ningún nivel académico, por lo que este documento está enfocado a despertar el interés en estudiantes e instituciones en incorporar esta información en el material de estudio de las áreas relacionadas a la materia. Este documento explica las consideraciones a tomar para ejecutar la actualización de un nuevo sistema de control de velocidad en motores de combustión interna. Además, incorpora la generación de un banco de pruebas para la simulación de operación de los Reguladores De Velocidad Electrónicos, este sistema de simulación permite mostrar de una manera muy didáctica el uso de las funciones de los nuevos reguladores de velocidad electrónicos, calibrarlos y ver el efecto que produce cada una de las constantes de control (Proporcional, Integral y Derivativo) en un sistema de Lazo cerrado de regulación de Velocidad. Mediante el sistema de simulación se pueden también simular secuencias de arranque y cambios de velocidad de operación en motores.

Abstract

This Project named "Upgrade of Hydro Mechanic Governors" explains the basic principles of operation for mechanic Governors since the first patented in 1870, and the most important improvements until the creation of the Digital Electronic Governors. Woodward Governor Company has been the leader in the development of Governors through history, creating unique innovations and improvements in all speed control systems. Woodward has facilities in almost all countries with trained personnel in this type of projects, but unfortunately this information has not been taught at school or universities. This document has the intention of getting people and institutions interested in studying and teaching these technologies. This text explains the considerations to take into account when you need to make an upgrade of the speed control system. In addition, it incorporates the creation of a test bench used to simulate the operation of electronic speed control governors. With this bench you can calibrate, operate and learn all the functions of the electronic governors. It can simulate the result of changing all the control constants (Proportional, Integral and derivative) in a close loop control system for speed control, it can simulate the speed changes in different operation modes.

Reguladores de Velocidad

1. Introducción

Los reguladores de velocidad son usados en unidades motrices con velocidad variable para controlar la velocidad de las mismas. Los reguladores de Velocidad actúan directamente controlando el suministro de combustible del motor. El 31 de Mayo de 1870 fue patentado el primer regulador de velocidad en Estados Unidos de América por Amos Walter Woodward, el cual controlaba la velocidad de un molino de viento (Ver Figura 1).

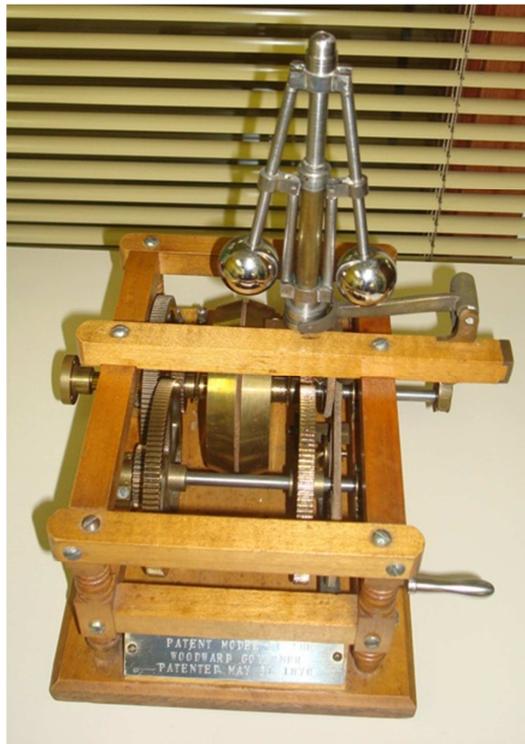


Figura 1: Primer Regulador de Velocidad

Patentado el 31/ Mayo/1870 por Amos Walter Woodward

A través del tiempo, junto con las mejoras tecnológicas, los reguladores de velocidad han ido evolucionando incluyendo mejoras de acuerdo a las necesidades de las diferentes aplicaciones:

motores de combustión interna, turbinas a gas, turbinas de vapor, turbinas hidroeléctricas, entre otras.

Debido al alto costo de las unidades motrices en las diferentes aplicaciones y a las mejoras que representa el cambio de un regulador de velocidad a un modelo más reciente, se han desarrollado varios proyectos para actualizar los reguladores de velocidad de unidades motrices con varios años de servicio.

A través de este documento, se estudiarán los reguladores de velocidad mecánicos, electrónicos y las ventajas de realizar el cambio de un regulador de velocidad mecánico a uno electrónico.

Un regulador de velocidad es una de los principales componentes de una unidad motriz, ya sea Motores de Combustión interna, turbinas, molinos, entre otros. Este permite controlar el suministro de combustible o la fuente de energía de la unidad motriz. Antiguamente era necesaria la presencia y control de una persona permanentemente para mantener la velocidad deseada. Los reguladores de velocidad permitieron fijar la velocidad deseada de un motor, y este a partir de ese momento es el encargado de mantener dicha velocidad, independiente de las variaciones de carga que se pudieran presentar.

Para estudiar los sistemas de regulación de velocidad, comenzaremos revisando los procesos de control.

Algo importante en la regulación de velocidad es el proceso de control en lazo cerrado, donde se monitorea continuamente la señal de salida del proceso, esta señal de monitoreo es enviada a la unidad de procesamiento de datos la cual ordena reajustar la señal de entrada de manera necesaria para disminuir el error entre lo esperado y lo obtenido.

Dentro de un proceso de control tenemos varios dispositivos, como los siguientes:

Sensores (medida).- miden la variable del proceso (temperatura, velocidad, presión, nivel, flujo, etc.) y la convierten en una señal útil para el equipo de control, por ejemplo un valor de una señal eléctrica.

Controlador (Unidad de procesamiento).- lee el valor del punto de control deseado, lo compara con el valor medido y reacciona a su diferencia de acuerdo al modo de control.

Actuador (acción).- recibe una señal del controlador y realiza una acción para modificar el comportamiento del proceso.

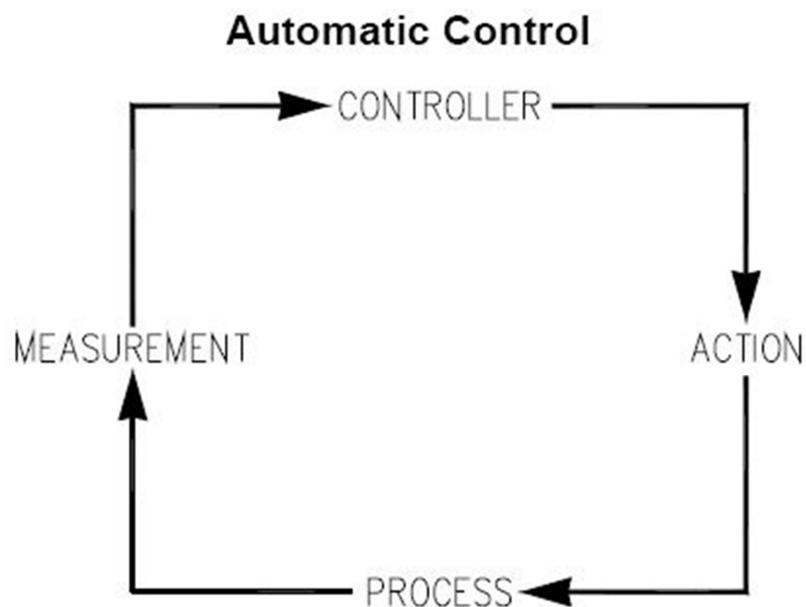


Figura 2: Esquema de Control Automático

En un sistema de lazo cerrado como el de la Figura 2, siempre se está midiendo la variable, procesándola y tomando acciones para evitar la desviación respecto de la consigna de la referencia, de tal manera que todo el tiempo se tiene el sistema operando de la manera deseada. Por lo tanto el proceso se resume en

- ❖ Medición (sensores)
- ❖ Decisión (Controlador)
- ❖ Acción (Actuador)

1.1. Principio de funcionamiento de un Regulador de Velocidad

Todas las fuentes de energía necesitan ser controladas de alguna manera con el afán de convertir la energía en una fuente de trabajo útil. El equipo esencial para controlar la velocidad en un motor, una turbina u otra fuente de poder es llamado Regulador de Velocidad o Gobernador (Governor). A cualquier fuente de poder o energía la llamaremos motor principal.

En una aplicación de Generación de Energía Eléctrica por ejemplo, el suministro de combustible (Diesel, Gas, crudo) de un Grupo Motor – Generador (GMG) es controlado por el regulador de velocidad. Un GMG es un equipo conformado por una unidad motriz y un generador o alternador eléctrico. El motor de combustión interna genera un movimiento rotacional controlado, este movimiento es transmitido a un generador eléctrico el cual convierte la energía cinética en energía eléctrica. El regulador de velocidad controla el suministro de combustible del motor de combustión interna controlando así la velocidad de rotación del eje o cigüeñal del motor. Al variar la velocidad del motor de combustión interna variamos el aporte de energía eléctrica a un sistema. La importancia del regulador de velocidad en un GMG radica en la

oportunidad de controlar el aporte de energía eléctrica en un sistema de demanda variable a través de controlar el suministro de combustible en un motor de combustión interna.

Un Regulador de Velocidad sensa la velocidad actual del motor principal y controla la fuente de energía (suministro de combustible, gas, agua, etc.) hacia el mismo para mantener la velocidad en el nivel deseado, de tal manera que toda la energía del proceso de combustión pueda ser usada en fines como: Generación Eléctrica, Bombeo, Propulsión, etc.

Una persona que haya conducido un auto, ha cumplido las funciones de Gobernador cuando controla la velocidad del auto bajo condiciones de carga variables.



Figura 3: El conductor es el Gobernador

Suponga que la velocidad límite en un tramo de carretera es 60 Km/h, la cual se convierte en la velocidad deseada (Ver Figura 3), el conductor monitorea el velocímetro para controlar la velocidad actual del auto. Si la velocidad actual y la velocidad deseada son las mismas, el acelerador se mantiene estable. Si no son iguales, se aumenta o disminuye el combustible cambiando la posición del acelerador hasta igualar las velocidades. En la Figura 6 se puede

observar que para equilibrar la velocidad actual con la velocidad de referencia es necesario aumentar o disminuir la velocidad, para esto es necesario aumentar o disminuir el suministro de combustible al motor.

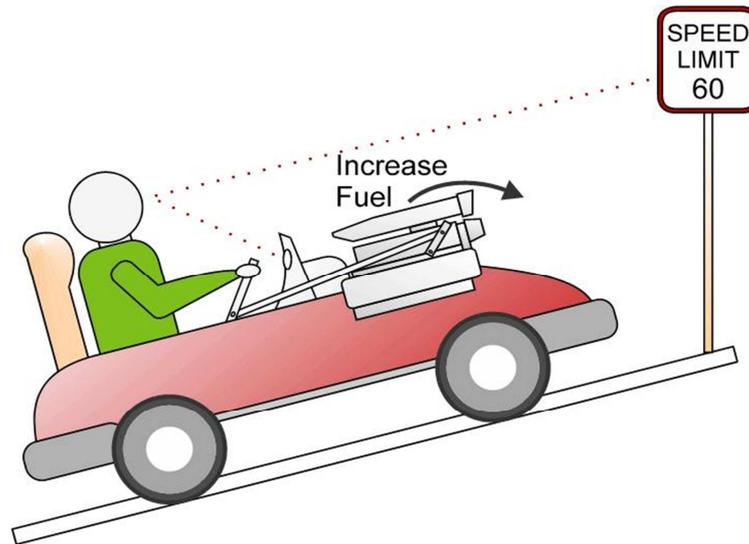


Figura 4: Aumento de Carga

Cuando el auto comienza el ascenso de una montaña (Figura 4), la carga aumenta y la velocidad actual decrece. El conductor nota que la velocidad actual es menor que la deseada y acelera para incrementar la velocidad actual, es decir, presiona el pedal del acelerador, esto envía más combustible al motor aumentando su fuerza y como resultado final mayor velocidad. El conductor efectúa esta acción hasta que el vehículo se desplace a la velocidad deseada.

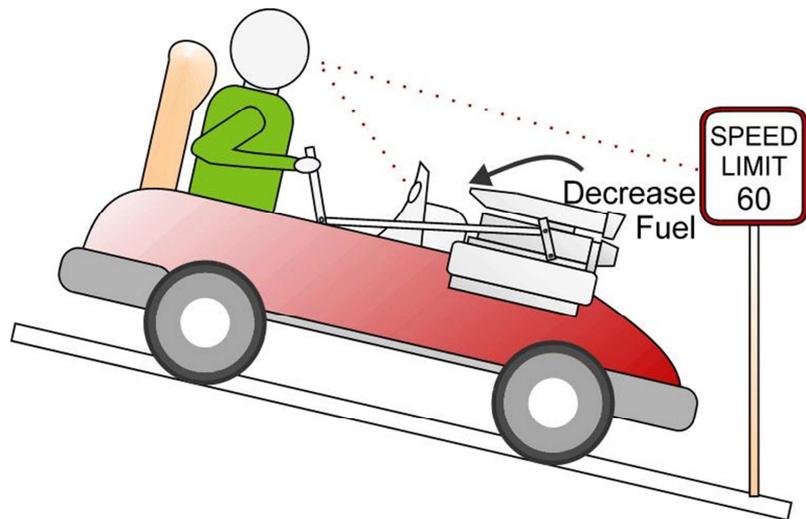


Figura 5: Disminución de Carga

Si el auto va por una bajada, la carga decrece y la velocidad actual incrementa. El conductor nota que la velocidad actual es mayor que la deseada y suelta el acelerador y/o frena para igualar la velocidad actual con la deseada en el decremento de carga (ver Figura 5).

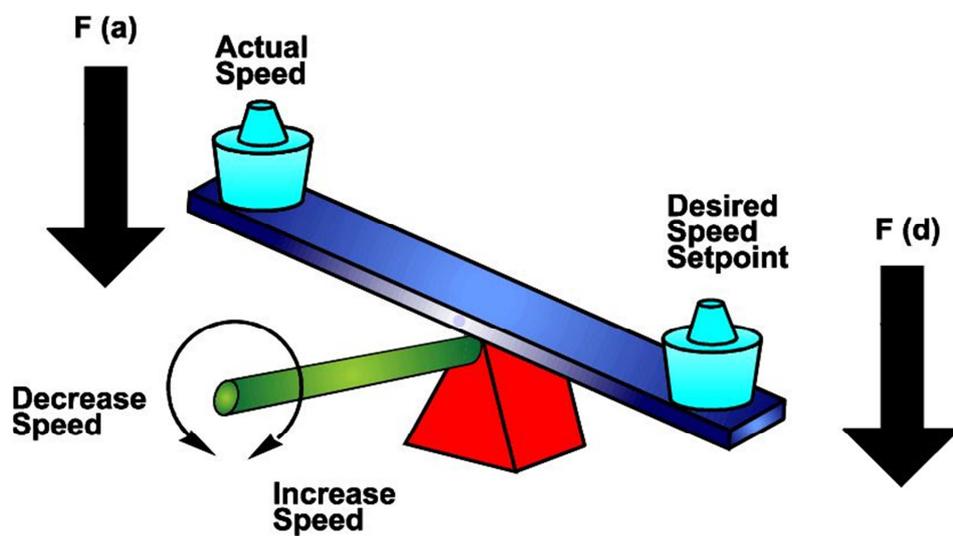


Figura 6: Balance de Velocidad

1.2. Componentes de un Regulador de Velocidad

Todos los reguladores de velocidad tienen cuatro componentes fundamentales (Ver Figura 7):

- Dispositivo para fijar la velocidad de referencia.
- Dispositivo para sensor la velocidad actual.
- Una manera de comparar la velocidad actual con la velocidad deseada.
- Una manera de aumentar y disminuir el suministro de combustible hacia el motor principal, para lograr estabilizar el motor después de la variación en el suministro de energía debido a una variación en la carga.

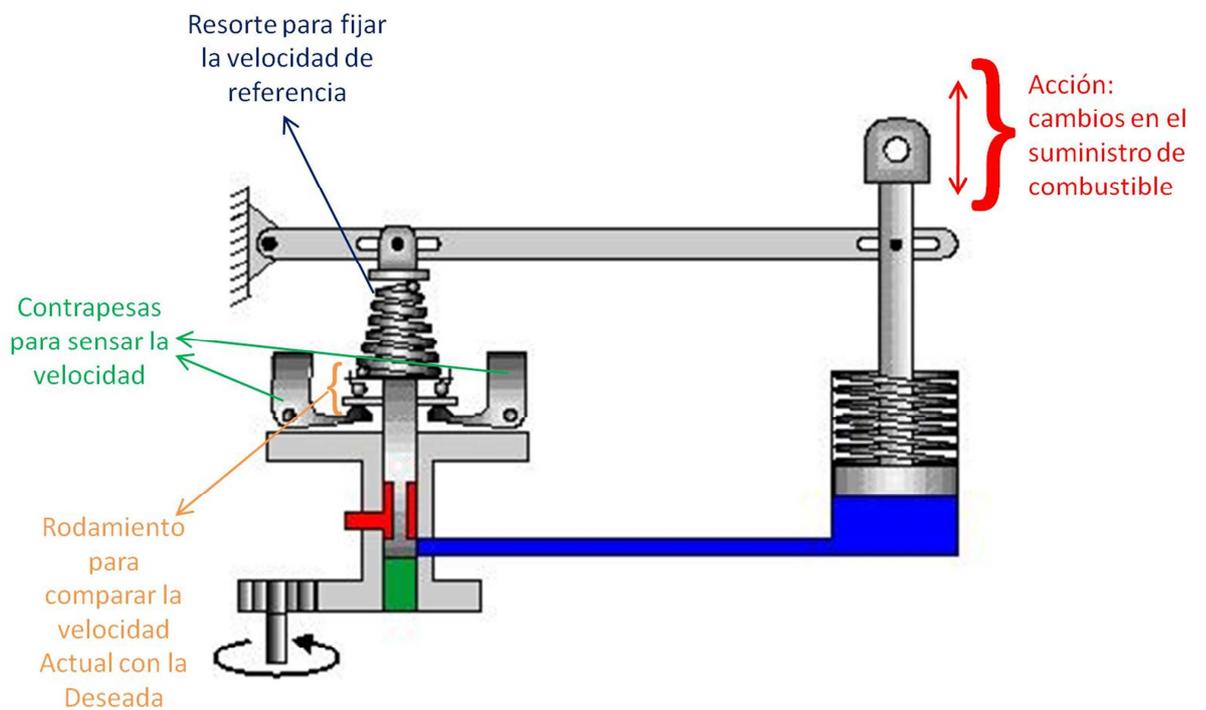


Figura 7: Componentes principales de un Regulador de Velocidad

Fijación de la velocidad de referencia.- esto es necesario para controlar eficientemente al motor principal. Los reguladores hidromecánicos usan un resorte para fijar la velocidad (ver Figura 7). Mientras más se ajusta el resorte, mayor es la magnitud de la velocidad fijada. Los controles electrónicos usan valores de voltaje o corriente para fijar la velocidad.

Sensar la velocidad.- el regulador debe recibir una señal que es proporcional a la velocidad del motor principal, en la Figura 7 se puede observar que esta velocidad se transmite desde el motor hasta las contrapesas de sensado de velocidad, en la parte inferior izquierda. En reguladores hidromecánicos, esto se realiza por la aceleración centrífuga de las contrapesas que rotan en un sistema que está conectado al motor principal por medio de un eje de transmisión, y está relacionado directamente a la velocidad de este. En controles electrónicos, esta señal se la obtiene de sensores de velocidad, alternadores, o generadores los cuales están relacionados directamente con la velocidad del motor principal. La velocidad es transformada a una señal eléctrica que el equipo de control pueda usar. En ambos casos, mientras más rápido anda el motor, mayor es la magnitud de la señal del sensor de velocidad.

Comparar la velocidad actual con la deseada.- En los reguladores de velocidad hidromecánicos se ajusta la velocidad deseada variando la presión sobre el resorte de fijación de velocidad, este resorte comprimido genera una fuerza de recuperación en dirección al rodamiento, de arriba hacia abajo (Ver Figura 7 y Figura 12). La aceleración centrífuga que se produce cuando giran las contrapesas, produce una fuerza de abajo hacia arriba sobre el mismo rodamiento (Esto se presentará a detalle en la sección 1.3.2). Estas dos fuerzas son comparadas.

Las dos fuerzas tienen direcciones opuestas y entonces la posición del rodamiento depende de la desigualdad de estas fuerzas. Cuando estas tienen el mismo valor, la resta será cero y por lo tanto la velocidad actual es la misma que la velocidad deseada. Si la fuerza producto de la velocidad deseada es de mayor magnitud que la fuerza centrífuga de las contrapesas de la velocidad actual (velocidad real < velocidad deseada), el regulador aumentará el suministro de combustible para igualar las fuerzas (acelerar el motor). Si la velocidad actual del motor es mayor que la velocidad deseada, el regulador disminuye el suministro de poder o combustible. Como el suministro de combustible cambia, la velocidad actual cambiará hasta que su resta con la velocidad deseada sea cero. Note que otras fuerzas pueden ser aplicadas mientras lo descrito anteriormente sucede, esto con el motivo de estabilizar y cumplir otras funciones que serán detalladas luego en este capítulo. En reguladores de Velocidad electrónicos la señal de velocidad actual se la obtiene de un sensor de velocidad, la frecuencia de la señal de este sensor se la convierte en una señal de voltaje. Esta señal se la compara en el controlador con el voltaje de referencia de la señal de velocidad deseada y el controlador produce la señal correctiva para equilibrar la velocidad real y de referencia. En la Figura 7 se puede apreciar los componentes que interactúan en la Comparación de la velocidad actual con la deseada.

Cambios en el suministro de combustible para el motor principal.- los reguladores de velocidad están conectados al sistema de suministro de combustible del motor principal. Cuando el regulador necesita hacer una corrección en el suministro de combustible para mantener la velocidad o carga, el eje terminal (ítem 11 de la Figura 8) se mueve en la dirección apropiada para corregir la posición actual del suministro de combustible. Para reguladores electrónicos, una señal eléctrica es enviada al actuador el cual convierte la señal eléctrica en una

fuerza mecánica para mover la fijación de suministro de combustible de la misma manera que lo hacen los reguladores hidro – mecánicos. El conjunto de acoples y varillas se las llama varillaje o sistema de palancas. Hay varios tipos de reguladores de velocidad y actuadores que tienen diferentes torques en el eje de salida para satisfacer todas las necesidades de los diferentes tipos de motores.

A continuación, vamos a detallar como funciona un regulador de velocidad Hidro-Mecánico y sus partes principales.

1.3. Partes Principales de un regulador de velocidad Hidromecánico

Las partes principales del regulador hidromecánico (Figura 8) son:

- Resorte de fijación de velocidad (2)
- Rodamiento para restar las fuerzas (3)
- Contrapesas (Sensor de Velocidad) (1)
- Embolo de la válvula piloto (6)
- Cilindro o buje de la válvula piloto (15)
- Bombas de aceite (13)
- Servo pistón o Pistón de Fuerza (9)
- Compensación (5)
- Eje de transmisión (10)
- Eje Terminal o eje de salida (11)

A continuación vamos a detallar la función de cada parte:

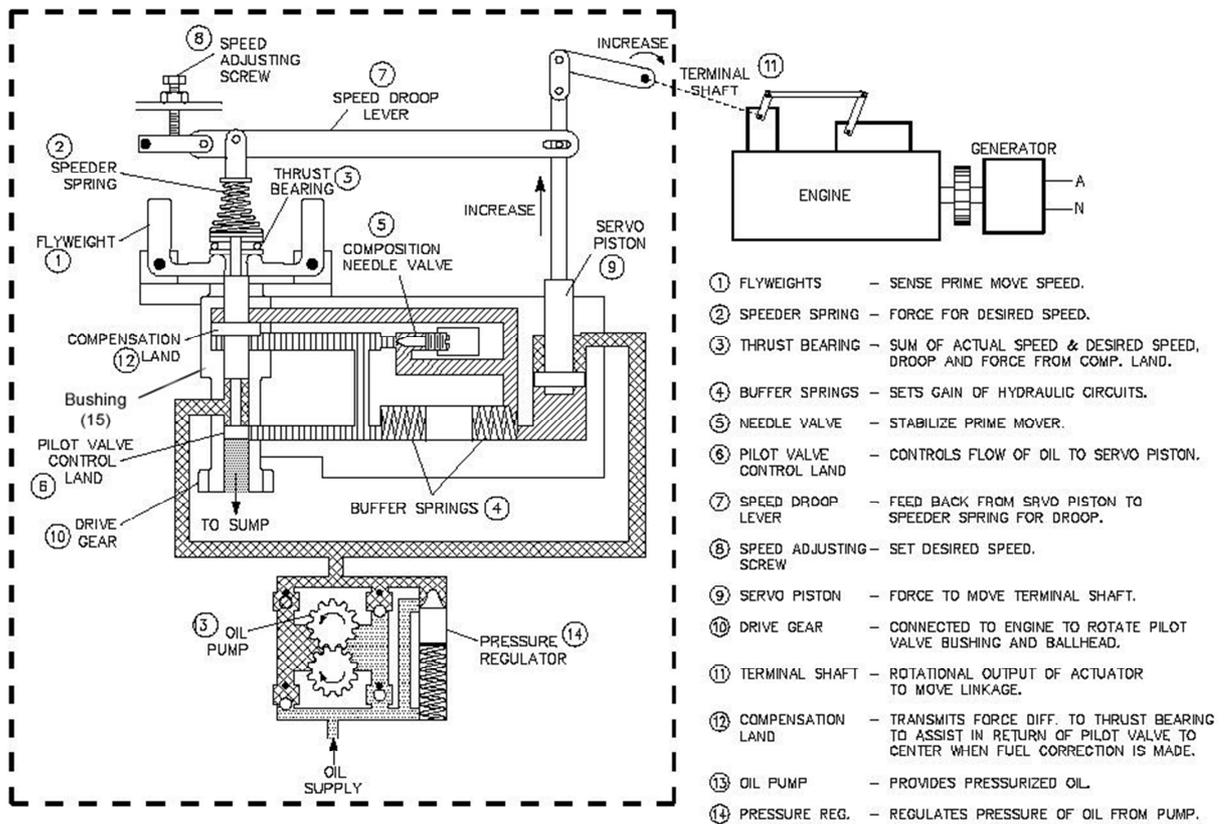


Figura 8: Regulador de Velocidad Hidromecánico

1.3.1. Resorte de fijación de Velocidad

Este resorte es la parte que fija la velocidad deseada. Si se aplica más fuerza hacia abajo en el resorte, esto causa que el regulador aumente el envío de combustible. La fuerza inicial es usualmente fijada por el operador con una velocidad de referencia. Esta puede ser fijada mediante el ajuste de un tornillo, una tuerca, una barra de nivel, un motor eléctrico, presión de aire o por solenoides dependiendo del tipo específico del regulador.

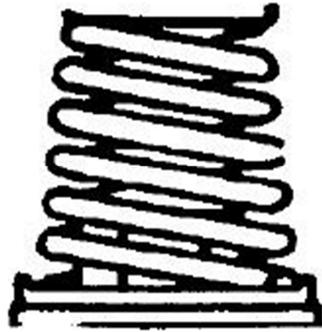


Figura 9: Resorte para la fijación de la velocidad deseada

El diseño o forma de este resorte es crítica para la apropiada operación del regulador (Figura 9). Generalmente tiene una forma cónica. Su forma ayuda a mantener un diseño más rígido lo que evita que se doble hacia los lados cuando una fuerza es aplicada. Hay otras formas de resortes que ofrecen fuerzas variables a lo largo de su longitud.

Algunos resortes son diseñados para operar de una manera casi lineal, y algunos son diseñados para una operación no lineal, de acuerdo al regulador específico (ver Figura 10).

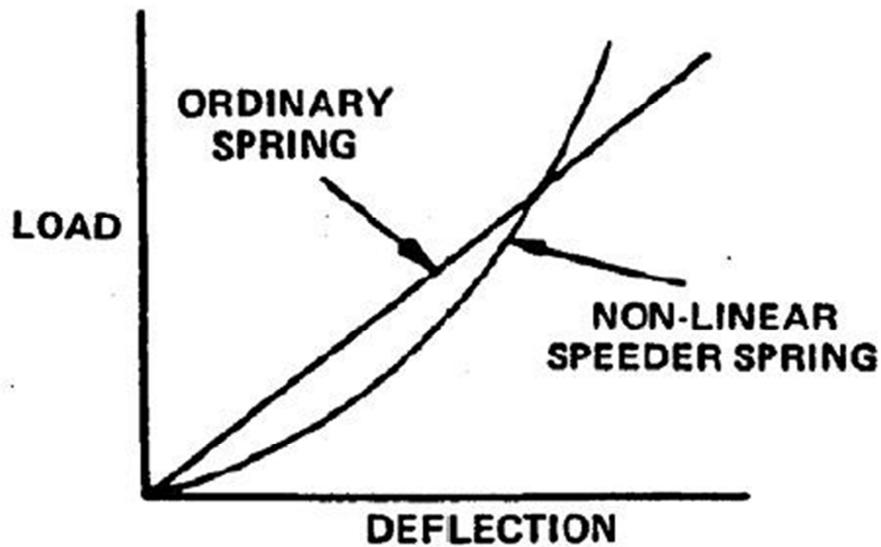


Figura 10: Deflexión del resorte de Fijación de Velocidad

1.3.2. Rodamiento y Contrapesas

El rodamiento es la parte donde la fuerza del resorte de fijación de velocidad y la fuerza de las contrapesas se restan. Si las dos fuerzas son iguales no hay carga sobre el rodamiento.

El uso de este rodamiento es necesario ya que las contrapesas están girando a varias revoluciones por minuto mientras el resorte permanece fijo, es por esto, que el rodamiento tiene dos caras, superior e inferior, que giran independiente la una de la otra (Ver Figura 11). El embolo de la válvula piloto se mueve de arriba abajo con el rodamiento y está ligado a este, ya sea directa o indirectamente. El émbolo no rota.

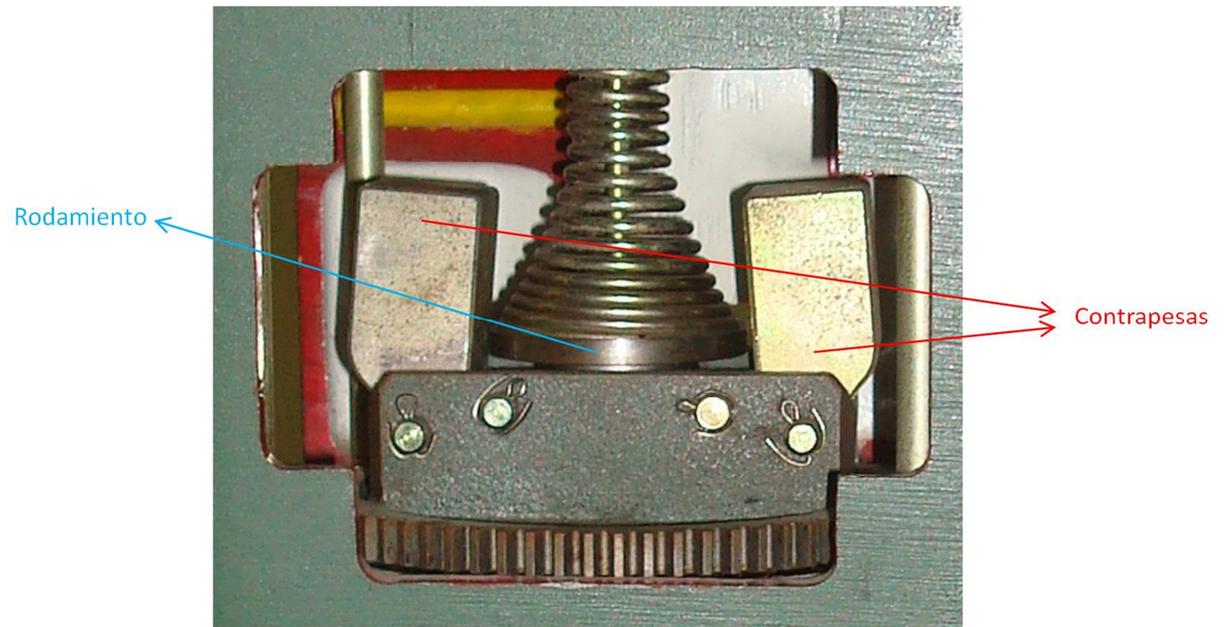


Figura 11: Contrapesas y Rodamiento

En la mayoría de reguladores hidromecánicos hay dos contrapesas, a 180 grados entre ellas. Las contrapesas rotan ya que están ligadas al eje de transmisión del motor y giran a la velocidad del motor o a una velocidad proporcional a la misma.

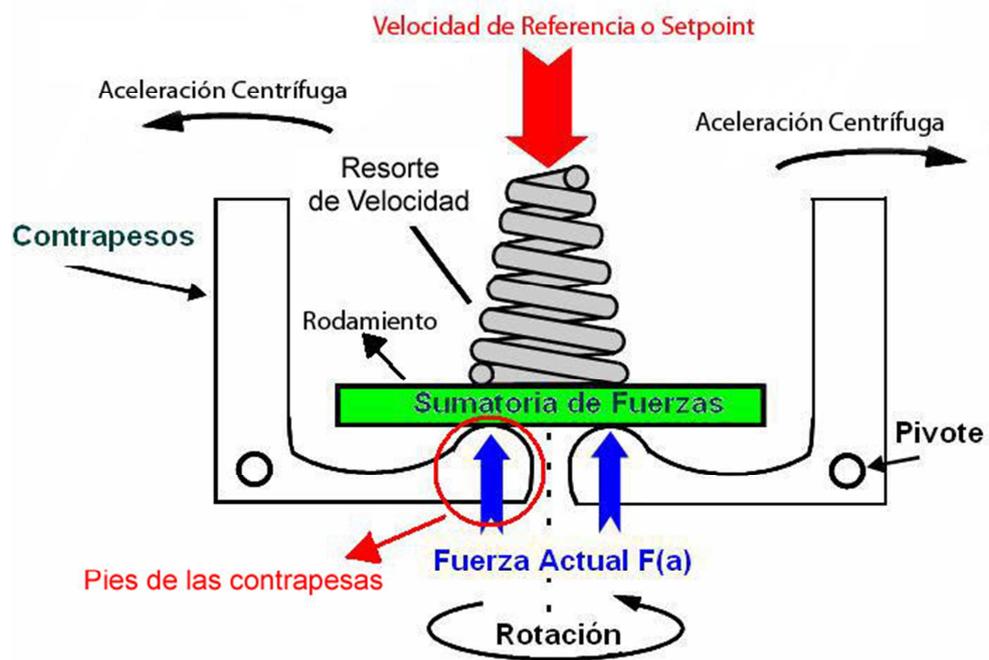


Figura 12: Cabeza del regulador Hidráulico

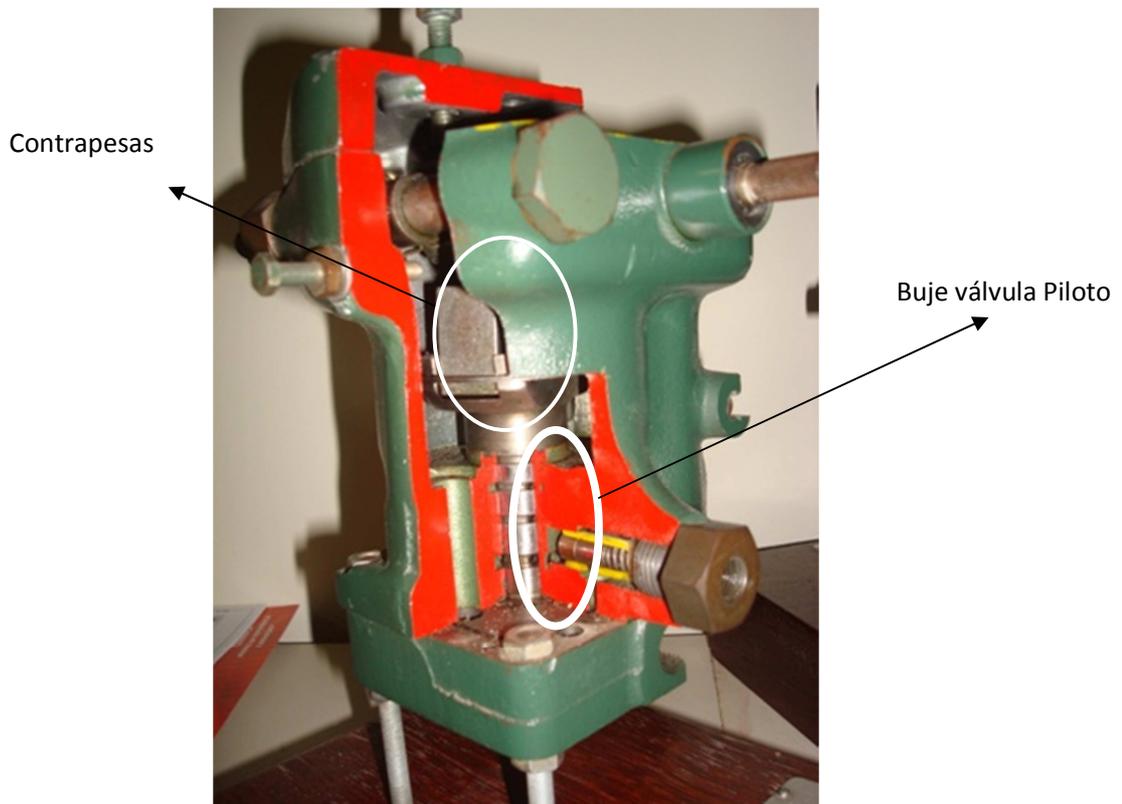


Figura 13: Corte de un regulador de Velocidad Modelo Woodward PSG

En la Figura 12 podemos ver como las contrapesas tienen un punto de pivote en su esquina inferior. Cuando la velocidad aumenta, las contrapesas se alejan en la parte superior debido a la aceleración centrífuga. Esto causa que los pies de las contrapesas aumenten la fuerza en el rodamiento y elevan el embolo de la válvula piloto. El efecto opuesto sucede cuando la velocidad decrece. La parte superior de las contrapesas se acerca, se reduce la fuerza en el rodamiento y la válvula piloto desciende. Cuando la velocidad del regulador es igual a la velocidad deseada, las contrapesas se encuentran en posición vertical, centrando la válvula piloto. Si las contrapesas están inclinadas hacia el centro, el motor está operando por debajo de la velocidad deseada y el regulador aumentará el suministro de combustible para aumentar la velocidad del motor hasta que las contrapesas y el motor alcancen la velocidad deseada fijada. Si las

contrapesas están inclinadas hacia fuera el motor está operando más rápido de lo deseado y el regulador disminuirá el suministro de combustible hasta que las contrapesas y el motor operen a la velocidad deseada fijada.

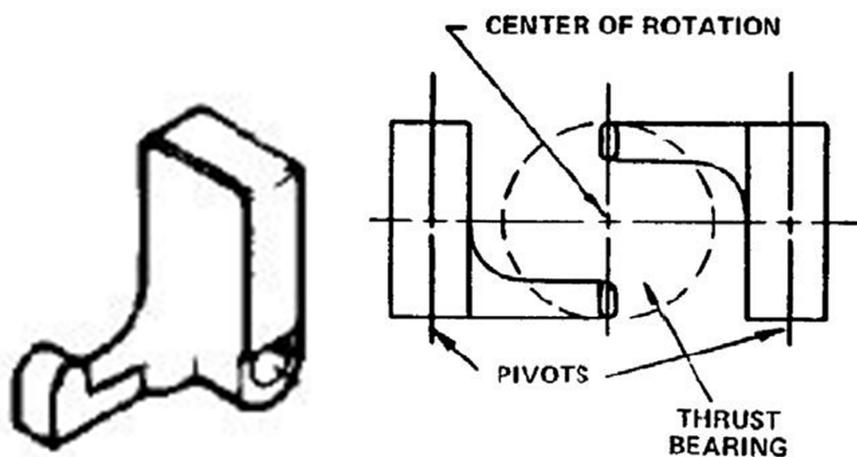


Figura 14: Contrapesas para minimizar la fricción

El perfil de los pies de las contrapesas (ver Figura 12 y Figura 14) están diseñados de tal manera que a cualquier velocidad de rotación, es decir, cualquier ángulo de inclinación de las mismas, el contacto con el plano de movimiento del rodamiento sea siempre en un solo punto. Es así que, tanto a bajas velocidades como en altas, la superficie de contacto sea mínima. Cualquier rotación de las contrapesas es transmitida al rodamiento con la mínima cantidad de fricción posible.

1.3.3. Válvula Piloto

El émbolo de la válvula piloto es posicionado por las fuerzas ejercidas en el rodamiento. Este se mueve de arriba abajo dentro de un buje rotatorio. El buje de la válvula piloto tiene aceite a alta presión que viene de la bomba de aceite.

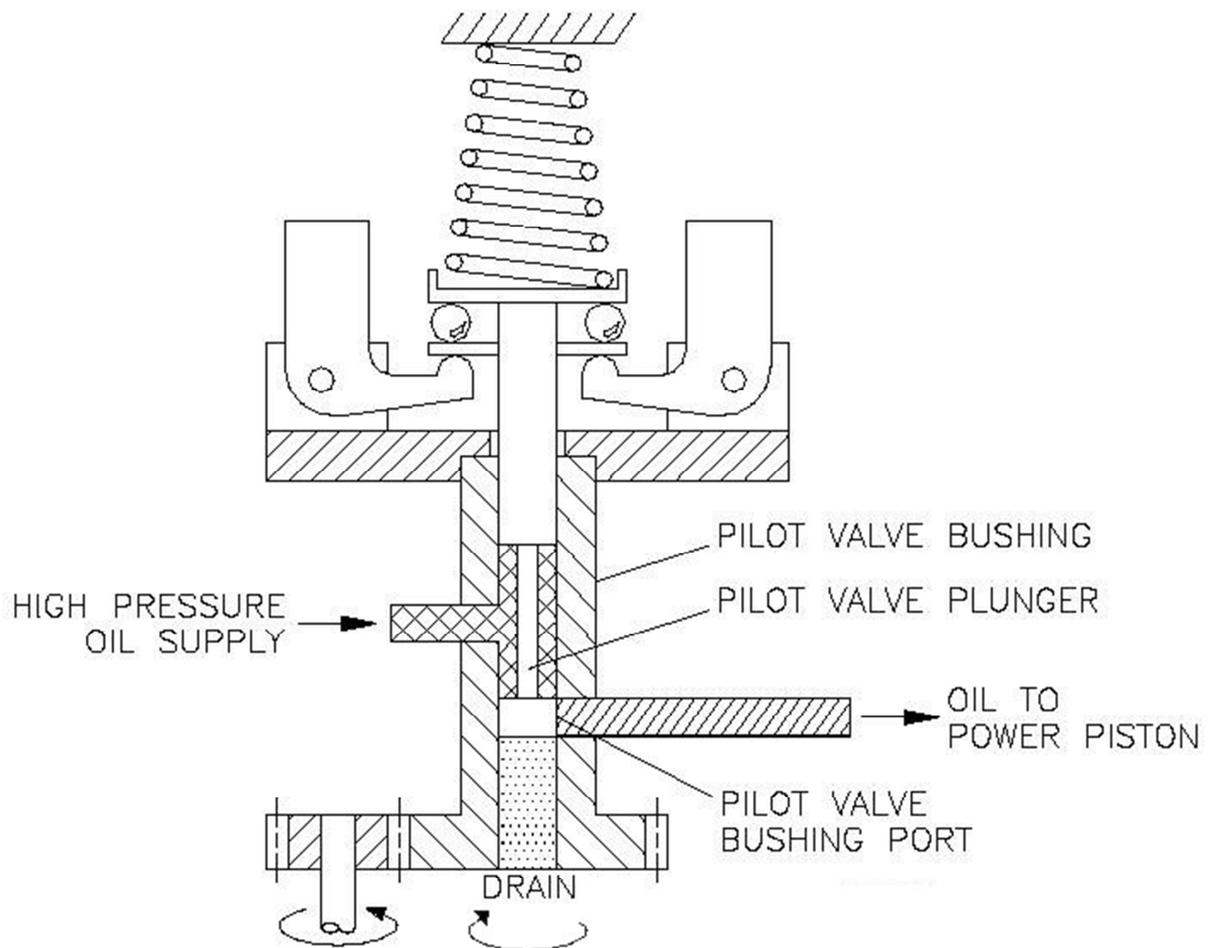


Figura 15: Operación de la Válvula Piloto

El buje de la válvula tiene puertos de entrada que permite el flujo de aceite hacia o fuera del cilindro del pistón de poder. Cuando el regulador y el motor están a la velocidad deseada, el

émbolo de la válvula piloto está centrado en el puerto del buje. Esto impide que aceite salga o entre al cilindro del pistón de poder. Ver Figura 15.

Si las contrapesas se inclinan hacia el centro, debido a un cambio de la velocidad o la carga, el émbolo se mueve hacia abajo y permite que aceite con alta presión ingrese al cilindro del servo pistón. Esto incrementará el suministro de combustible.

Si las contrapesas se inclinan hacia fuera, debido a un cambio de velocidad o de carga, el émbolo de la válvula se mueve hacia arriba permitiendo que el aceite del cilindro del servo pistón escape hacia el cárter. Lo que disminuirá el suministro de combustible.

El buje de la válvula piloto gira, ya que se encuentra acoplado al engranaje del eje de transmisión y a las contrapesas, mientras que el embolo permanece estático, este está acoplado al rodamiento y este al resorte de fijación de velocidad de referencia (ver Figura 15). Si el buje gira y el embolo permanece estático se minimiza la fricción estática y permite que el émbolo se mueva con mínimos cambios en la velocidad. Existen pequeños conductos por donde circula aceite que permite la irrigación y lubricación hacia todas las partes móviles del Regulador de Velocidad.

En la Figura 16, podemos observar dos tipos de bombas de aceite usadas en reguladores de velocidad, el tipo de la izquierda (bombas de engranaje de desplazamiento positivo) opera con dos engranajes, al girar los engranajes de la bomba, el aceite es llevado desde el depósito (cárter) hacia el espacio entre los dientes y las paredes del compartimiento del lado opuesto, lado de

descarga, para luego ser forzado a pasar hacia los acumuladores de presión, generando que el compartimiento de los acumuladores se presurice.

1.3.4. Bombas de aceite

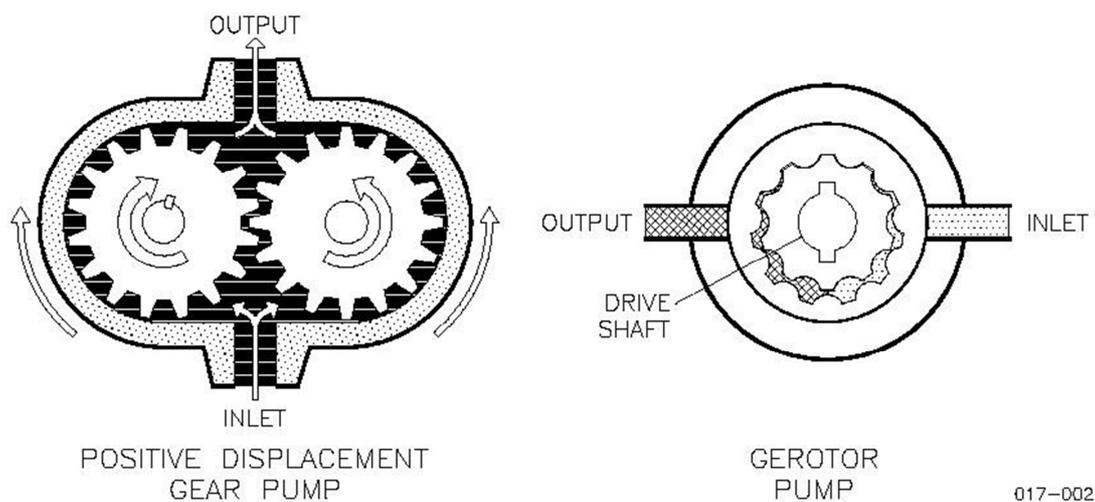


Figura 16: Bombas de Aceite

En la Figura 16 derecha, podemos observar una bomba llamada (Gerotor), el engranaje interno tiene un diente menos que el engranaje exterior. Al girar el engranaje interno, se genera un espacio entre engranajes el cual conduce el aceite del depósito hacia el circuito de los acumuladores, generando que se presuricen las cámaras de los acumuladores.

La mayoría de reguladores hidro - mecánicos y actuadores usan el eje de transmisión para hacer girar una bomba de hidráulica (ver Figura 16), la cual provee de aceite con alta presión para el sistema de control de la válvula piloto.

Al estar operando el regulador y su bomba de aceite, se puede sentir el aumento de temperatura en el mismo, lo que evidencia que energía calorífica fue producida por efectos de fricción en los componentes internos de la bomba de aceite, esta energía calorífica son pérdidas en el sistema. Al momento de calibrar el Regulador de Velocidad, se simula la operación normal del mismo en el motor, es decir, se debe usar el mismo tipo de aceite y dejarlo que este adquiera su temperatura de trabajo, para que los parámetros sean fijados de acuerdo a la condición actual de operación (alta temperatura) y las pérdidas estén consideradas como parte de las características de cada Regulador en particular.

Las bombas de aceite de los reguladores de velocidad pueden ser diseñadas para permitir la rotación en una sola dirección o en las dos, esto es para que el regulador pueda ser usado en motores que operan en ambas direcciones. Válvulas anti retorno son usadas para definir la rotación de la bomba en una de las direcciones.

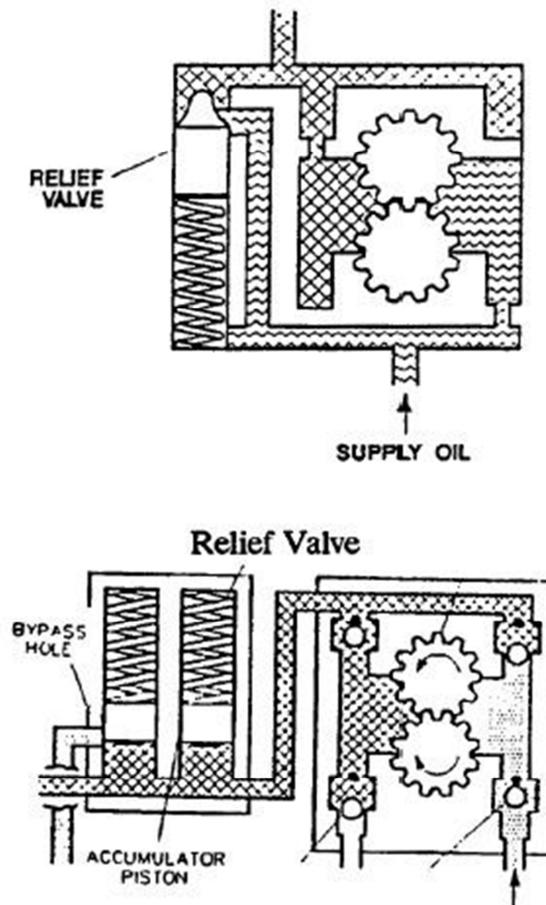


Figura 17: Válvula de Alivio de un regulador y un Actuador

Las bombas con un solo engranaje interno permiten la rotación en una sola dirección. La bomba debe ser removida y rotada 180° para cambiar el sentido de rotación del engranaje interno.

Las bombas son diseñadas para proveer más presión y flujo del que se necesita para el regulador. El flujo extra de aceite a presión es enviado al cárter. Los reguladores de velocidad pequeños usan válvulas de alivio, mientras que los reguladores grandes usan un sistema de acumulación el cual provee un reservorio de aceite con resortes comprimidos que es usado

cuando la demanda de aceite a presión excede la capacidad de entrega de la bomba de aceite. La presión en los acumuladores de aceite en la mayoría de reguladores de velocidad está entre 100 y 500 psi (690 – 3448 kPa). Esta presión varía de acuerdo a los requerimientos de poder en el eje de salida (servo pistón de poder).

La función del acumulador se muestra en la Figura 17, el aceite presurizado del lado de descarga de la bomba primero llena los múltiples conductos del sistema y luego empuja los pistones del acumulador hacia arriba en contra de la fuerza de los resortes. Cuando la presión aumenta lo suficiente para mover el pistón arriba de la perforación de desfogue, el exceso de aceite de las bombas regresa al cárter. Los acumuladores entonces no solo proveen de un reservorio de aceite presurizado, sino también actúa como válvula de alivio para limitar la presión máxima en el circuito hidráulico.

Dirección de Rotación

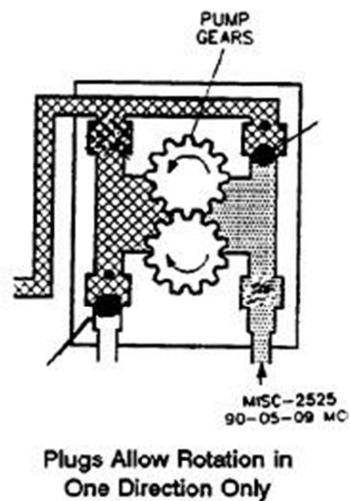
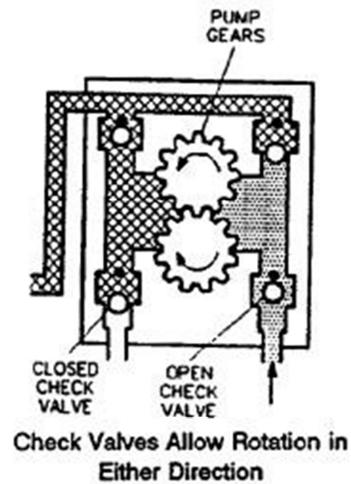


Figura 18: Rotación de la Bomba de Aceite

El arreglo de las cuatro válvulas anti-retorno del lado de succión y descarga de la bomba de aceite permiten que el eje de transmisión del regulador giren en cualquier dirección, sin realizar ningún cambio al regulador (ver Figura 18 parte superior). La dirección de la bomba de rotación no afecta el sistema hidráulico ni la operación del Regulador de Velocidad.

Algunos reguladores son construidos sin válvulas anti - retorno. En este caso, 2 tapones remplazan las dos válvulas anti - retorno cerradas y el regulador siempre gira en una sola dirección (ver Figura 18 parte inferior). Para cambiar la dirección de rotación en estos reguladores, la ubicación de los tapones debe ser cambiada removiendo la base del regulador.

La bomba con un engranaje interno rota en un solo sentido de rotación. Para cambiar la dirección de rotación hay que rotar los engranajes 180 grados con respecto a su posición actual.

Si los tapones o la bomba de engranaje interno giran en sentido contrario al establecido, el regulador no tendrá nada de presión en el aceite y no podrá controlar el motor. Esto puede también dañar el regulador de velocidad. La rotación del eje está siempre disponible en la base del mismo.

1.3.5. Pistón de Poder

El movimiento del émbolo de la válvula piloto del regulador direcciona el flujo de aceite desde y hacia el pistón de poder, de esta manera se puede controlar el movimiento del pistón de poder. El pistón actúa a través de un sistema de varillaje para controlar el suministro de combustible hacia el motor.

Se pueden usar dos tipos de servo pistones en los reguladores de velocidad:

- Un sistema cargado con resortes donde el aceite presurizado es usado para incrementar la posición de salida. Cuando el aceite presurizado del pistón de poder, es drenado hacia el cárter, el resorte causa que la posición del pistón sea la de mínimo combustible (ver Figura 19).

- Un pistón diferencial, usa el aceite presurizado para mover el pistón en las dos direcciones (ver Figura 23).

1.3.5.1. Servo Pistón cargado con Resortes

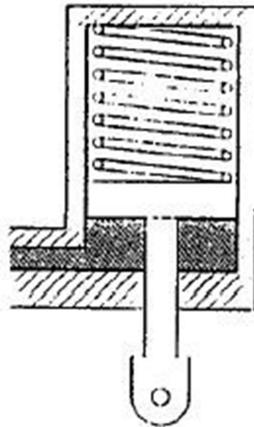


Figura 19: Servo Pistón cargado con Resorte

El resorte continuamente presiona el pistón hacia abajo en dirección de la posición mínima de combustible (Ver Figura 20). Sin embargo, el pistón no puede moverse a menos que el émbolo de la válvula piloto sea movido arriba de su centro para permitir que el aceite bajo el pistón sea drenado hacia el cárter (Ver Figura 22). Si el émbolo de la válvula piloto baja, permite que el aceite presurizado de la bomba se dirija hacia el pistón y lo empuje hacia arriba (ver Figura 21), contra la fuerza del resorte, en dirección del aumento de combustible.

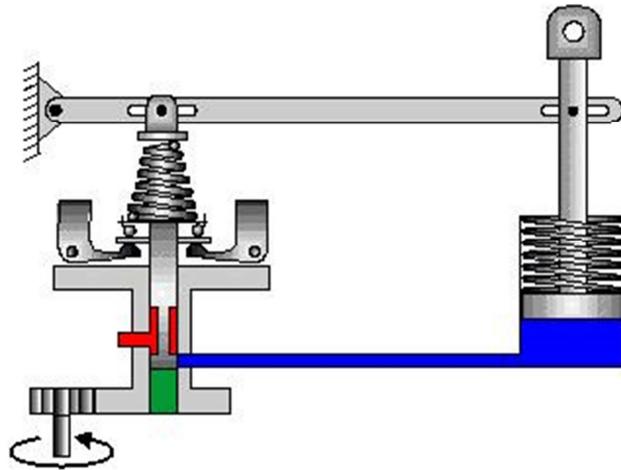


Figura 20: Servo Pistón cargado con resorte, con la válvula piloto centrada

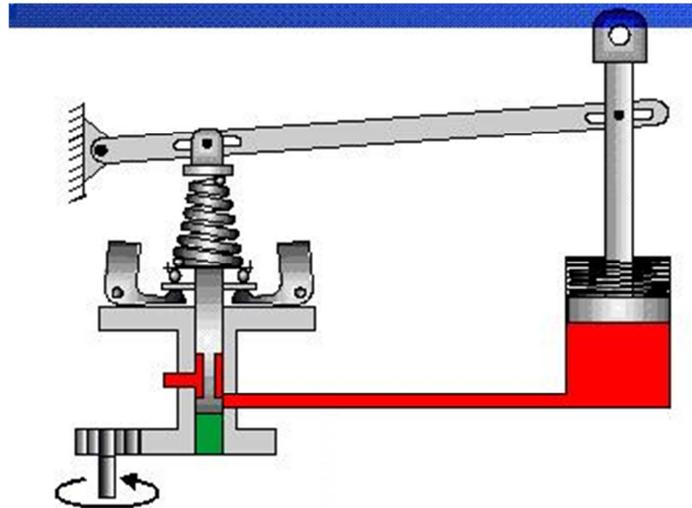


Figura 21: Servo Pistón cargado con resorte, con la válvula piloto desplazada hacia abajo

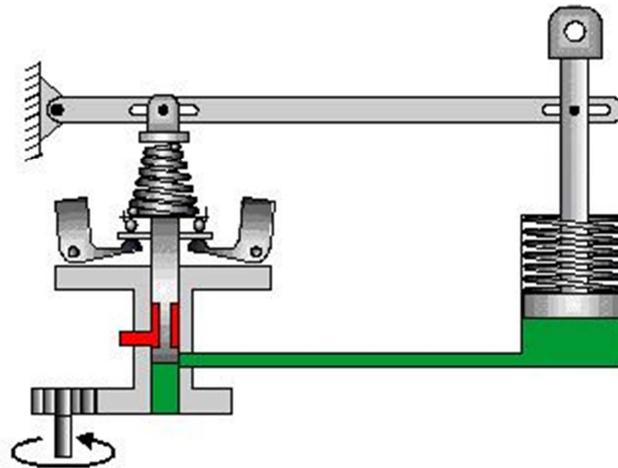


Figura 22: Servo Pistón cargado con resorte, con la válvula piloto desplazada hacia arriba

Se debe tomar en cuenta que el servo pistón solo se va a mover cuando el émbolo de la válvula piloto no está centrado, permitiendo el flujo de aceite en el sentido requerido. Cuando el émbolo está centrado, el pistón esta hidráulicamente asegurado en una posición.

La salida del servo pistón puede ser un movimiento empuja-jala o puede ser convertido en un movimiento rotatorio. Si la presión de aceite falla, el diseño del sistema debe enviar al pistón a la posición de mínimo combustible para permitir que el motor se apague.

1.3.5.2. Servo – Pistón Diferencial

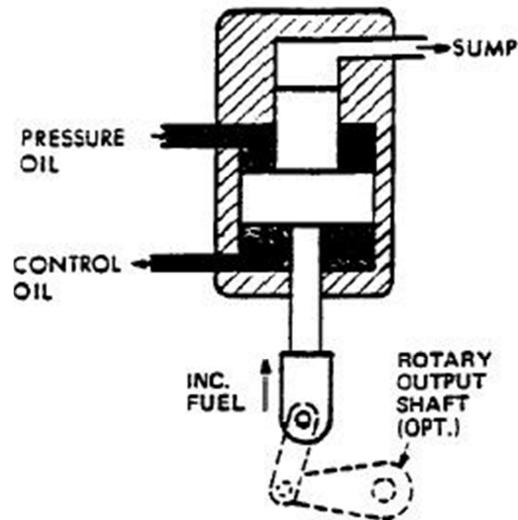


Figura 23: Servo Pistón Diferencial

El servo pistón requiere aceite presurizado para moverse para cualquier dirección (aumento o disminución de combustible). Este tipo de sistema tiene un área mayor en un lado del pistón que en el otro. Aceite presurizado esta siempre siendo dirigido hacia el lado de menor área. Esta constante presión empuja el pistón en dirección de la posición mínima de combustible, pero el pistón se puede mover solo si la válvula piloto esta elevada de su centro, permitiendo que el aceite se escape hacia el cárter. Ver Figura 24.

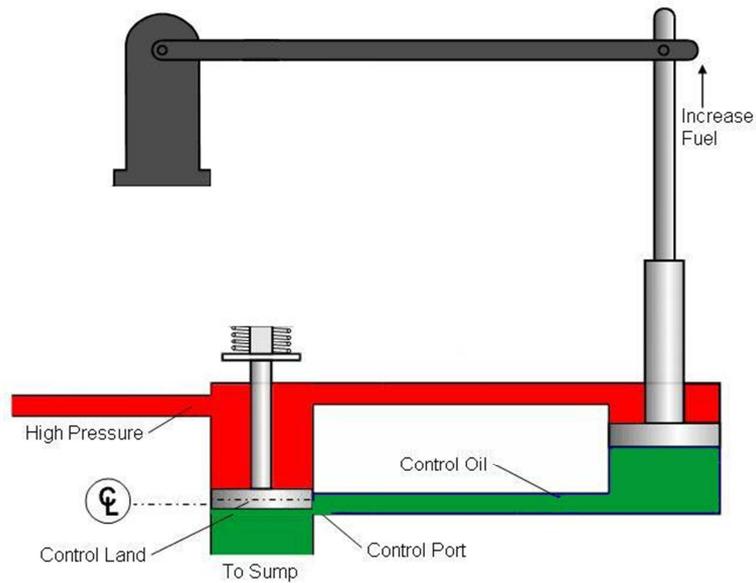


Figura 24: Válvula Piloto sobre su posición Central

Si la válvula piloto está bajo su posición central, el aceite de control fluye hacia la parte inferior del servo pistón (área grande). La presión en los dos lados del pistón es la misma, la misma presión en una superficie con mayor área produce mayor fuerza, lo que mueve al pistón hacia la posición de aumento de combustible. Ver Figura 25.

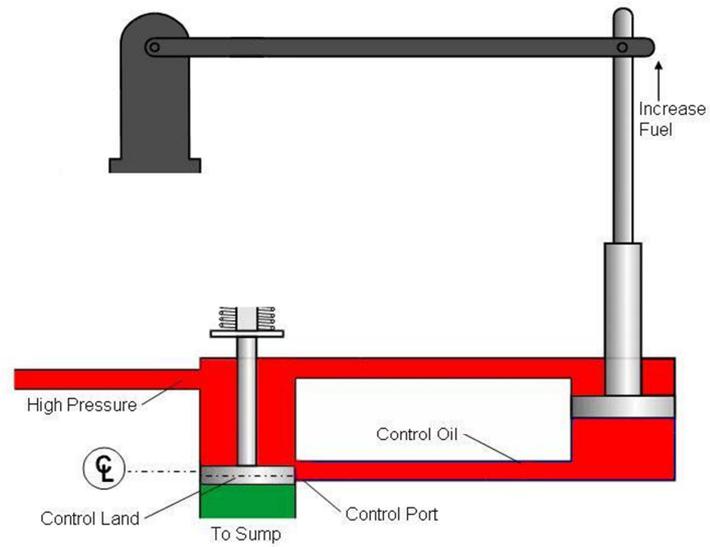


Figura 25: Válvula piloto bajo su posición central

Note que el pistón solo se puede mover cuando el émbolo de la válvula piloto esta descentrado y permite el flujo de aceite en la dirección requerida. Cuando el pistón está centrado el servo esta hidráulicamente asegurado. Ver Figura 26.

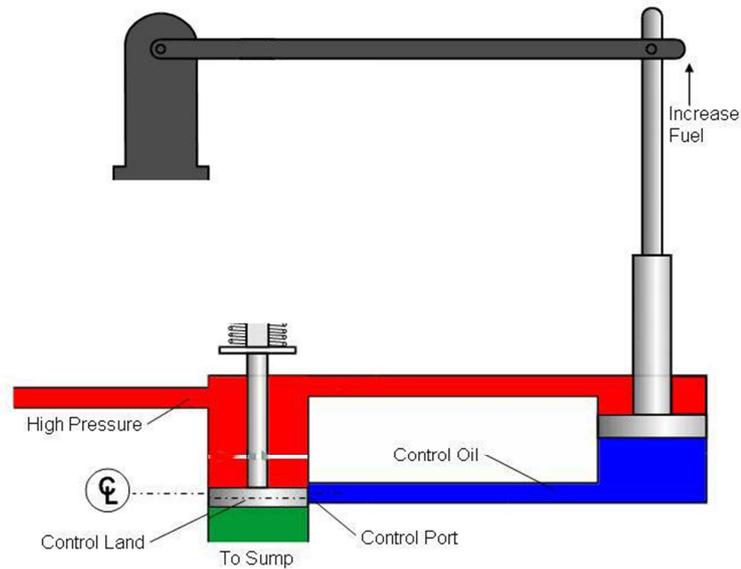


Figura 26: Válvula Piloto en su posición central

El aceite presurizado es dirigido a la parte superior e inferior del pistón de poder, como que existieran dos pequeños circuitos hidráulicos entre la válvula piloto y el pistón. Uno para cada sentido de movimiento. La acción del pistón puede ser de tipo jala y empuja (o sea un movimiento lineal) o con movimiento rotatorio, como podemos ver en la Figura 23.

Todo el aceite existente en el circuito hidráulico se mantiene presurizado en los acumuladores del regulador de velocidad, su cantidad es suficiente para llenar la cámara superior del servo pistón y enviar al servo a posición de mínimo combustible (apagado) si se produjera algún fallo en el Regulador de Velocidad.

1.4. Modos de operación de un Regulador de Velocidad

1.4.1. Modo Isócrono

Viene de los vocablos griegos Iso + Chronous = Igual + tiempo. Es decir, que un regulador de velocidad operando en modo isócrono mantiene una velocidad constante en el tiempo, independiente de la aplicación de carga (Ver Figura 27)

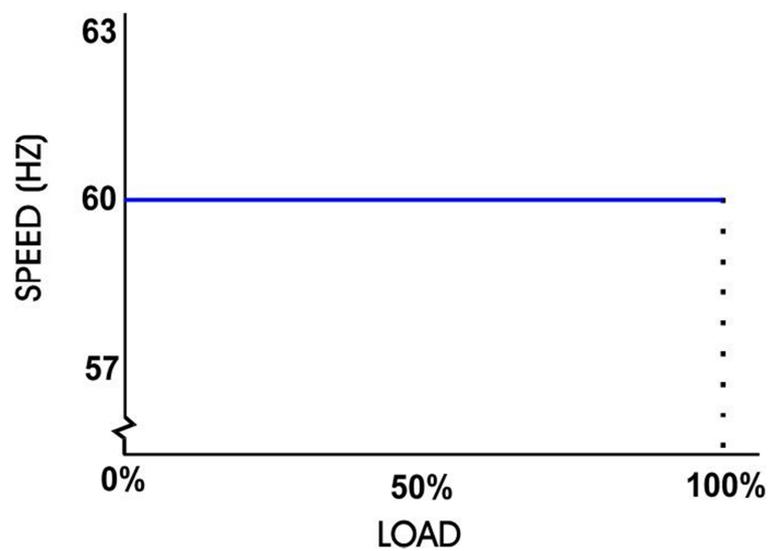


Figura 27: Curva de respuesta de un sistema de Regulación de Velocidad en modo Isócrono

1.4.2. Modo con Caída de Velocidad o Droop

A la caída de velocidad se la define como un decremento en la velocidad de referencia cuando la carga aumenta. Tiene muchos usos y aplicaciones que permiten que el control de la velocidad de un motor sea estable.

El droop se calcula como un porcentaje de la diferencia entre la velocidad sin carga (en vacío) y la velocidad con carga máxima dividida para la velocidad sin carga.

La fórmula para calcular el Droop es la siguiente:

$$\% \text{Droop} = \frac{\text{Velocidad sin carga} - \text{Velocidad con carga máxima}}{\text{Velocidad sin carga}} \cdot 100$$

Ecuación 1

Los reguladores de Velocidad Hidro – mecánicos simples, tienen la función de droop incorporada y siempre operan con droop. Los reguladores de velocidad más complejos incluyen la función de droop temporal, el cual regresa la velocidad fijada a su original una vez que el motor se ha estabilizado luego del cambio de velocidad o carga. El droop temporal se lo llama compensación.

Un regulador de velocidad operando con 0% de Caída de Velocidad está operando en modo Isócrono.

1.4.3. Modo de funcionamiento de un Regulador de Velocidad con o sin

Droop

En un sistema sin la función de droop, un aumento de carga provocaría que el motor disminuya su velocidad. El regulador de velocidad respondería aumentando el combustible hasta

que la velocidad del motor regrese a la velocidad original. Debido a la combinación de la inercia y el retraso en la respuesta, la velocidad del motor continuará aumentando después de alcanzar su velocidad deseada, causando que se sobre revolucione. El regulador de velocidad responderá a esto disminuyendo el suministro de combustible para corregir la sobre velocidad. Esto sobre corregiría la velocidad en la otra dirección causando que el motor gire a bajas revoluciones, esta sobre corrección de la velocidad en las dos direcciones (inestabilidad) se amplificaría hasta producir que el motor se sobre revolucione provocando daños en el mismo (Ver Figura 28)

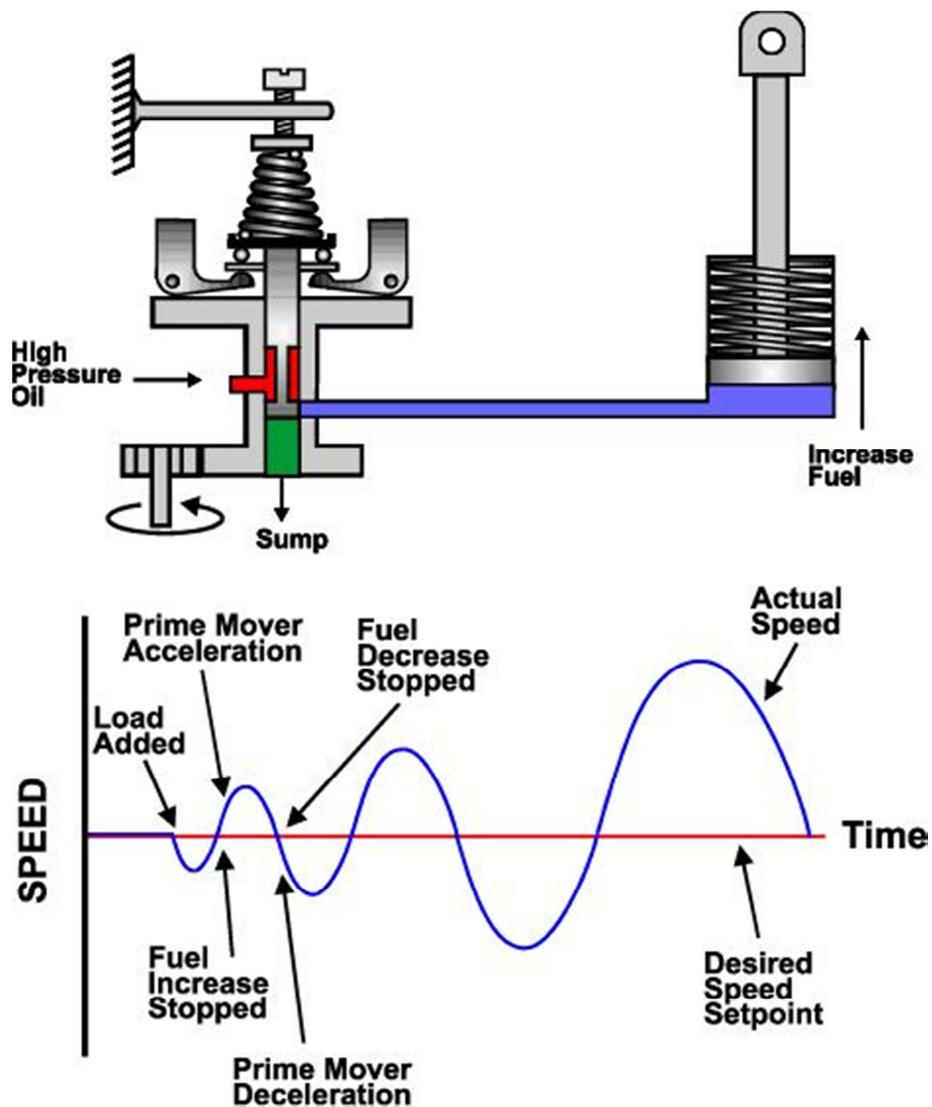


Figura 28: Curvas de respuesta de un regulador sin Droop o Compensación

La inestabilidad de un sistema puede ser eliminada con el Droop. Mientras la carga aumenta, la velocidad de referencia decrece. Cuando el regulador actúa para corregir el decremento de velocidad causado por el incremento de carga, este corregirá a una velocidad deseada más baja. Esta velocidad fijada más baja previene que el motor se sobre revolucione.

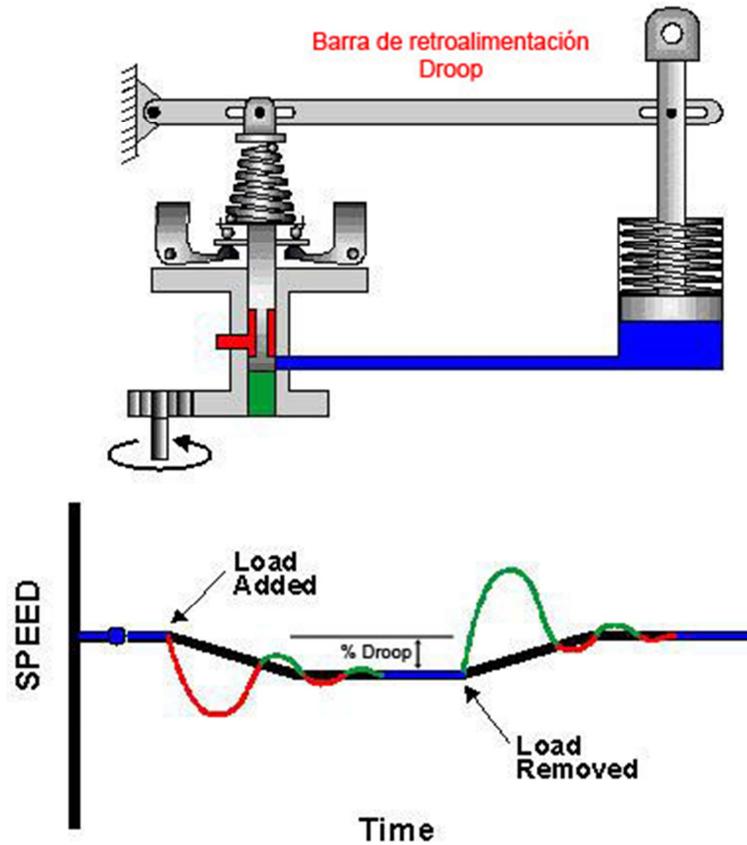
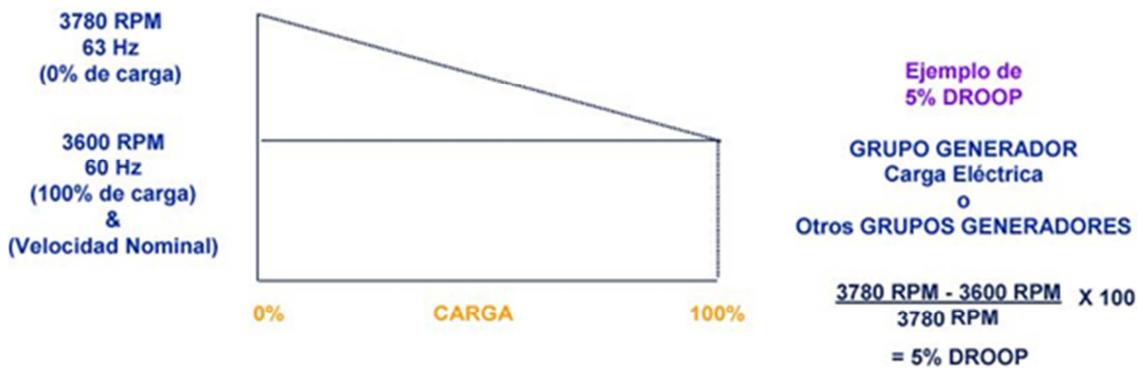
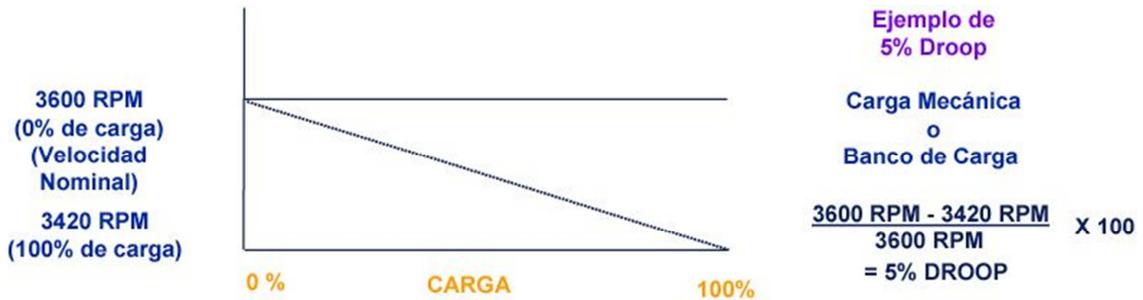


Figura 29: Curva de respuesta de un Regulador de Velocidad con Droop

En la Figura 29, podemos ver que existe una barra llamada barra de retroalimentación Droop y sirve para ajustar la Caída de Velocidad, la cual está acoplada al lado derecho al pistón de fuerza.

Cuando la carga es aplicada al motor, el pistón de poder se mueve hacia arriba para incrementar el suministro de combustible. La barra de retroalimentación del droop está conectada al servo y al resorte de fijación de velocidad. La barra de retroalimentación jala el resorte para reducir la fuerza. Con menos fuerza aplicada en el resorte, la fijación de velocidad decrece, causando la acción de la caída de velocidad lo que mantiene la carga a una velocidad de fijación más baja.

A continuación un ejemplo de cómo se calcula el porcentaje de droop.



Para remover el droop de un regulador de velocidad y dejarlo operando en modo Isócrono es necesario calibrarlo en 0% de Droop. Muchos reguladores Hidromecánicos tienen una perilla en su parte frontal con la cual se puede ajustar el porcentaje de Droop del 0% al 10%.

En la Figura 30, en la parte superior izquierda se puede observar la leva para el ajuste del Droop, al girarla esta cambia el punto de apoyo de la barra del Droop que presiona el resorte de ajuste de la velocidad de referencia

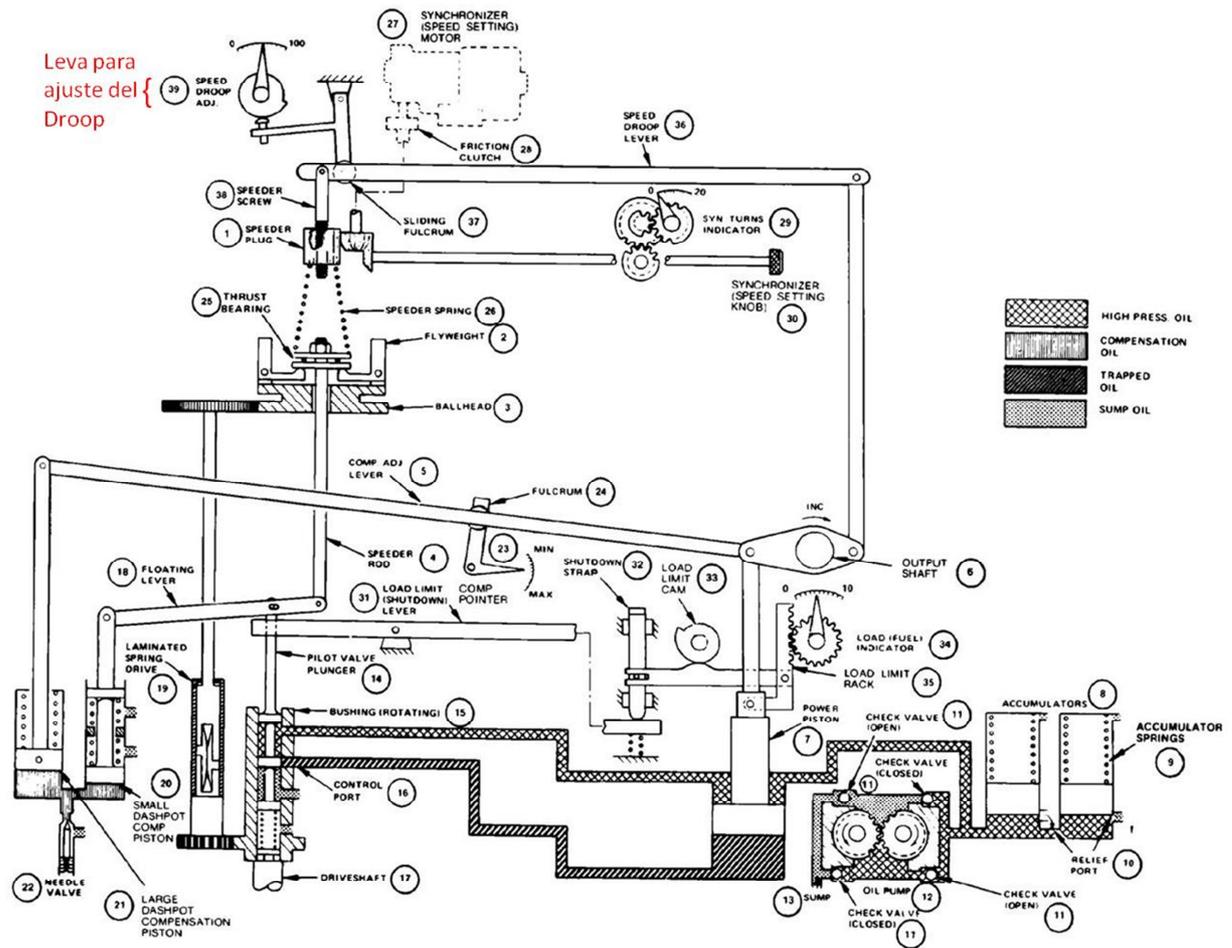


Figura 30: Esquema de Regulador de Velocidad Woodward UG-8

1.4.4. Regulador de velocidad con compensación

En estos reguladores se incorporó un sistema conformado por: Zona de compensación en la válvula piloto (Compensation Land), Válvula Aguja (Needle Valve), Pistón de compensación (Buffer Piston), Resortes de compensación (buffer Springs) (ver Figura 31).

Para este tipo de reguladores, cuando la carga es aplicada, la velocidad actual es menor que la velocidad deseada, por lo que la válvula piloto se desplaza hacia abajo, esto permite que aceite

presurizado (color rojo en la Figura 31) se dirige hasta el pistón de compensación y posteriormente al pistón de fuerza, al desplazarse el pistón de compensación una fuerza temporal ejercida por el sistema de compensación empuja hacia arriba la válvula piloto en la zona de compensación de la válvula piloto. Esta fuerza se suma a la fuerza de las contrapesas para cerrar la válvula piloto antes que la nueva velocidad del motor sea alcanzada. Esta adición de la fuerza temporal actúa en el regulador como que si la velocidad deseada se habría fijado a menor magnitud. La fuerza a través de la válvula aguja del sistema de compensación es reducida a cero y el motor regresa a su velocidad normal de funcionamiento. Esto es conocido como droop temporal.

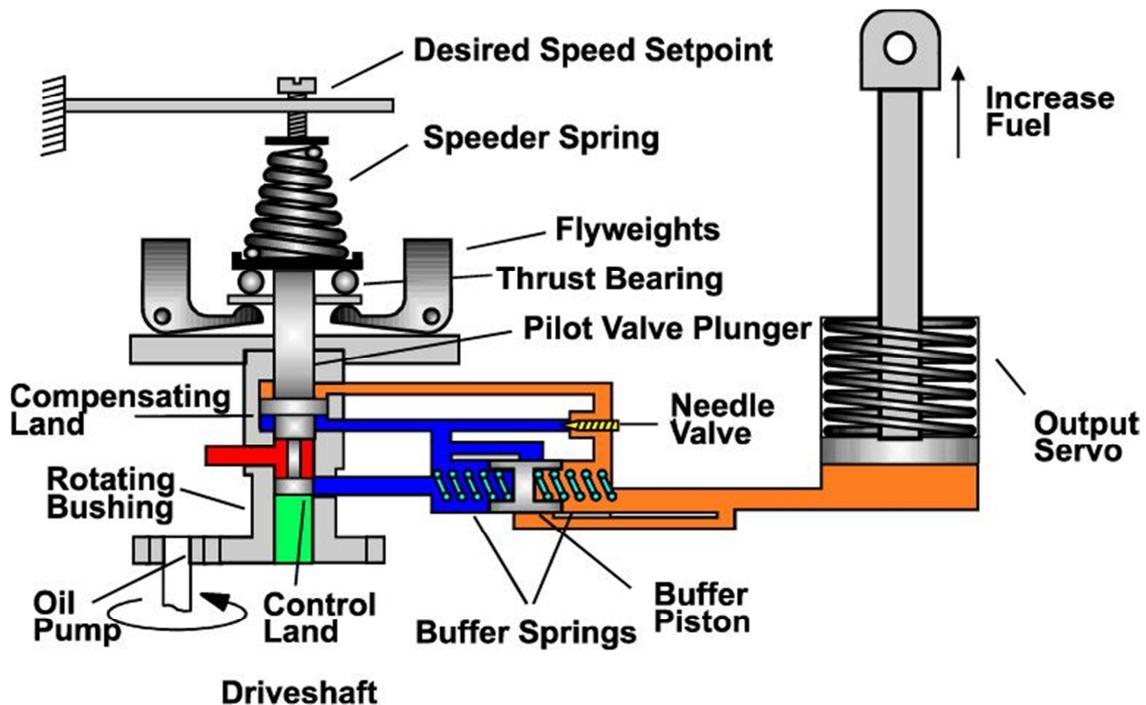


Figura 31: Esquema de un Regulador de Velocidad con un sistema de compensación hidráulica de presión

El Droop en este tipo de reguladores de Velocidad actúa cada vez que existe un cambio de carga. Mientras la carga permanece constante, el sistema de compensación del regulador de

Velocidad (Droop Temporal) permanece en espera de una nueva perturbación (Aumento/Disminución de carga).

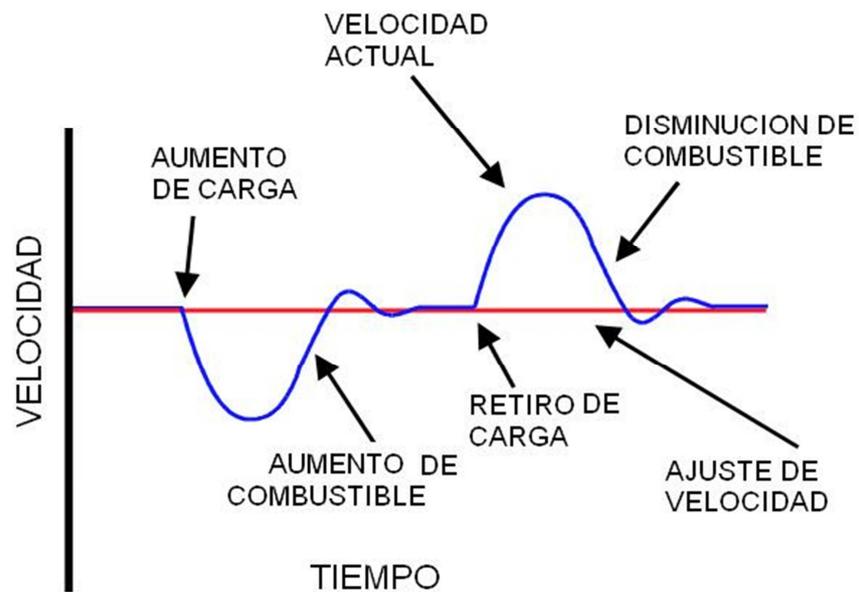


Figura 32: Curva de un sistema de Regulación de velocidad con compensación hidráulica de presión

1.4.5. Usos del Droop

1.4.5.1. Unidad aislada

La mayoría de reguladores de velocidad son capaces de operar en modo isócrona, sin embargo, la caída de velocidad o Droop es necesaria para algunas aplicaciones.

Los motores aislados pueden operar en modo isócrona o con Droop, ya que su operación no es afectada por ningún otro motor o utilidad. En la operación isócrona, la velocidad regresa a su velocidad original después de que una carga ha sido aplicada. En la operación con Droop, la velocidad decrece en un porcentaje después que la carga fue aplicada. En el modo con Droop, si se

desea que el motor opere a la velocidad original, el operador debe aumentar la velocidad deseada para regresar a este luego que la carga fue aplicada.

1.4.5.2. Sistemas aislados

Un sistema aislado es una aplicación donde dos o más motores operan con una carga común. Existen diferentes tipos de aplicaciones, en los cuales el motor esta acoplado a generadores eléctricos, bombas, motores de propulsión u otras. Estos sistemas aislados no están conectados a ningún otro sistema como un oleoducto, red pública eléctrica con otras operando en paralelo a distancia.

En un sistema aislado es necesario controlar el modo de operación de todos los equipos que están aportando en el sistema, ya que al combinar varios modos de operación podemos provocar oscilaciones de carga en el sistema, lo que puede ocasionar que las maquinas se sobrecarguen o trabajen sin carga. Un modo de operación recomendable cuando tenemos varias unidades contribuyendo a una misma carga, es el modo Droop, este modo permite que los equipos controlen su carga frente a las oscilaciones que se puedan presentar en el sistema.

El modo isócrono puede ser usado en un motor, operando en paralelo con otros. Hay que tomar en cuenta si los reguladores de velocidad tienen habilidades para repartir carga en modo isócrono. Si dos motores operando en modo isócrono sin ningún control de repartición de carga están administrando energía a la misma carga, una de las unidades va a tomar la carga completa y la otra va a ceder su carga. Si el objetivo es que dos unidades compartan su carga, se debe estudiar algunos principios de repartición de carga en modo isócrono.

La razón por la que un motor toma la carga de otra unidad será explicada con el siguiente ejemplo:

Si dos unidades operando en modo isócrono son acopladas juntas a la misma carga y la velocidad fijada de operación es diferente, el sistema comienza a perder su balance una vez que estas son acopladas. Ya que no puede haber dos diferentes velocidades en un mismo sistema acoplado, un motor comenzará a aumentar su velocidad y el otro a disminuir la velocidad hasta llegar a un promedio entre las dos. El regulador de velocidad de la unidad que disminuyó la velocidad, aumentará el suministro de combustible para corregir la velocidad. El Regulador de velocidad de la unidad que aumento su velocidad, disminuirá el suministro de combustible para corregir el aumento. El resultado será que la unidad que tiene fijada una velocidad de operación mayor que la otra, comenzará a tomar la carga de la otra unidad hasta alcanzar su máxima carga, y la otra unidad cederá su carga hasta motorizarse (se convierte en carga para el otro motor).

Por lo tanto unidades de un mismo sistema no pueden operar en modo isócrono sin un esquema de control de repartición de carga.

No debe existir juego muerto en este sistema de palancas entre el regulador de Velocidad y el motor. Esto puede causar que la velocidad del motor cambie de manera diferente a lo esperado por el regulador de velocidad. El control de la velocidad no será óptimo si la respuesta de motor a los cambios de velocidad no es la esperada.

La operación de un regulador de velocidad está basada asumiendo que el sistema de palancas está correctamente instalado, de tal manera que cualquier cambio en el eje de salida del regulador de velocidad provocará un cambio proporcional en el suministro de combustible al motor (ver Figura 34).

Los arreglos del sistema de palancas permiten transmitir el ángulo del eje terminal al sistema de suministro de combustible. Por consiguiente, una variación en la posición del eje terminal produce la misma variación en la posición del sistema de combustible, lo llamaremos sistema de palancas lineal, en cambio si la variación no es directamente proporcional, lo llamaremos sistema no lineal.

La mayoría de sistemas de inyección a diesel tienen una respuesta lineal a las variaciones de suministro de combustible, (Figura 34). Por otro lado, también existen sistemas con respuestas no lineales, es decir, se requiere una calibración distinta a los diferentes niveles de carga del motor. (Usualmente en motores con carburador o válvulas en forma de mariposa, Figura 35).

Todos los Reguladores de Velocidad tienden a proveer una respuesta lineal, y se puede variar la rapidez de la respuesta del motor al cambiar la ubicación de la palanca central del varillaje. modificando la posición del varillaje como se puede observar en la Figura 37.

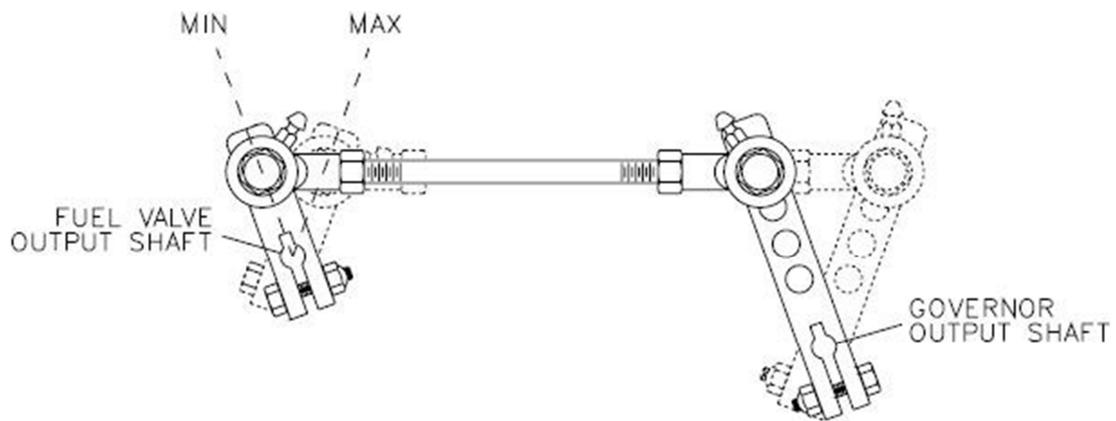


Figura 34: Sistema de Palancas Lineal

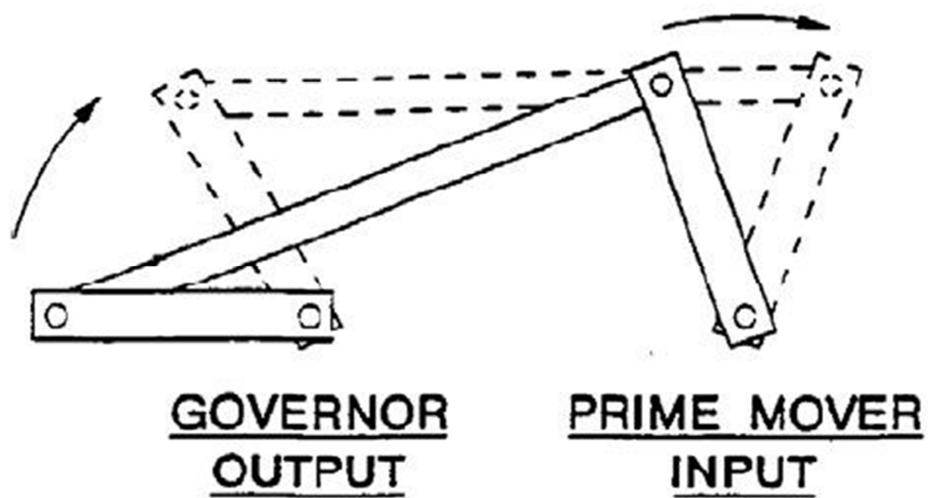


Figura 35: Varillaje no Lineal

1.5.1. Viaje o recorrido del eje Terminal del Regulador de Velocidad

El diseño del varillaje del combustible debe proveer control desde la posición de “No combustible” hasta “Máximo combustible” entre los límites del recorrido total del eje Terminal del Regulador de Velocidad. Es recomendación del fabricante Woodward Governor Company que el diseño debe también proveer control en los 2/3 del recorrido total del Regulador para las posiciones entre “Sin Carga” y “Máxima Carga” [1]. (Ver Figura 36). Si se usa más de los 2/3 del recorrido entre el punto de sin Carga y Máxima Carga, puede ocasionar que no se llegue a la posición de apagado del motor en caso de una parada de emergencia, o el punto de carga máxima no se alcance al punto de recorrido máximo del Regulador.

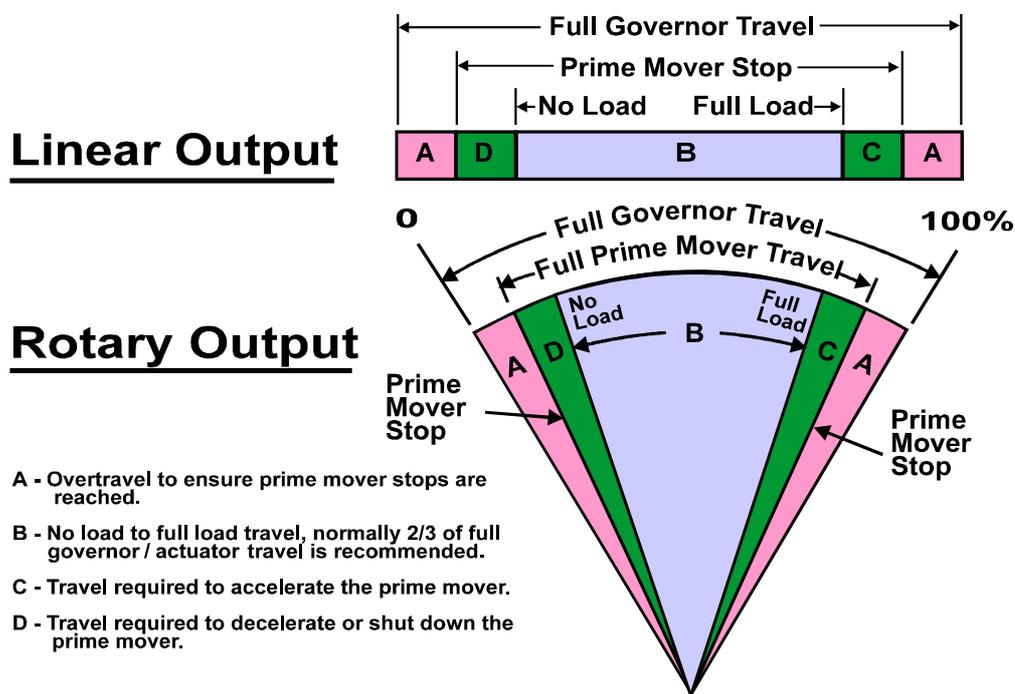


Figura 36: Uso Correcto del recorrido del eje terminal del Regulador de Velocidad

1.5.2. Arreglos Lineales en el Sistema de Palancas

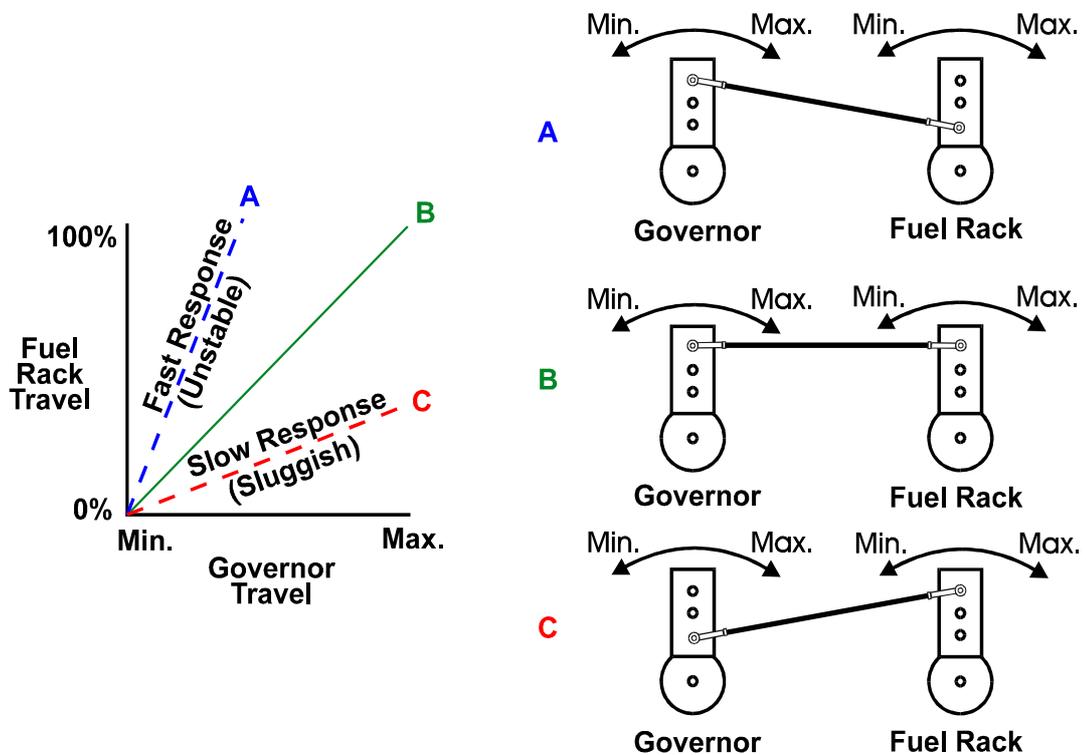


Figura 37: Diferentes arreglos en el sistema de Palancas

En la Figura 37 A, observamos un arreglo en el cual un pequeño movimiento del eje terminal del Regulador de Velocidad produce un gran movimiento en la bomba de inyección del motor. Esta configuración provoca una respuesta rápida en los cambios de velocidad pero genera una tendencia de inestabilidad. La proporcionalidad en esta configuración es alta.

En la Figura 37 B, podemos ver una configuración estable en la cual la misma rotación del eje Terminal del Regulador de Velocidad es transmitida a la bomba de inyección del motor.

Figura 37 C, en esta configuración tendremos un pequeño movimiento en la bomba de inyección a un gran giro en el eje Terminal del Regulador de Velocidad. La respuesta es lenta lo

que provoca retraso a las acciones correctivas de cambios de velocidad. La proporcionalidad en esta configuración es baja.

Este tipo de arreglos lineales son usados en aplicaciones donde la posición del eje terminal del Regulador es directamente proporcional al torque de salida en el motor.

Si se usa menos recorrido que el recomendado tendremos respuestas rápidas que pueden crear inestabilidad, La repartición de carga usando Droop es limitada o imposible si se usa un recorrido muy corto el eje Terminal.

Si se usa más del $2/3$ del recorrido del Regulador se puede provocar que el sistema de inyección llegue a la posición de apagado o de máximo combustible sin que eso sea requerido. El recorrido debe ser configurado de tal manera que se asegure que estas posiciones no sean alcanzadas. Por eso es recomendable usar $2/3$ del recorrido total para las posiciones de vacío (sin carga) a máxima carga. [10]

1.5.3. Arreglos No Lineales

Los sistemas con carburadores de válvulas tipo mariposa tienen características de control no lineales. A posiciones mínimas (baja carga), la válvula debe moverse muy poco para cambiar el flujo de combustible en gran cantidad. En cargas pesadas, la válvula debe moverse grandes cantidades para provocar cualquier cambio en el flujo de combustible. Este tipo de configuraciones es un ejemplo de configuraciones no lineales (ver Figura 38), las cuales no son muy comunes pero pueden ser usadas si los requerimientos así lo determinan.

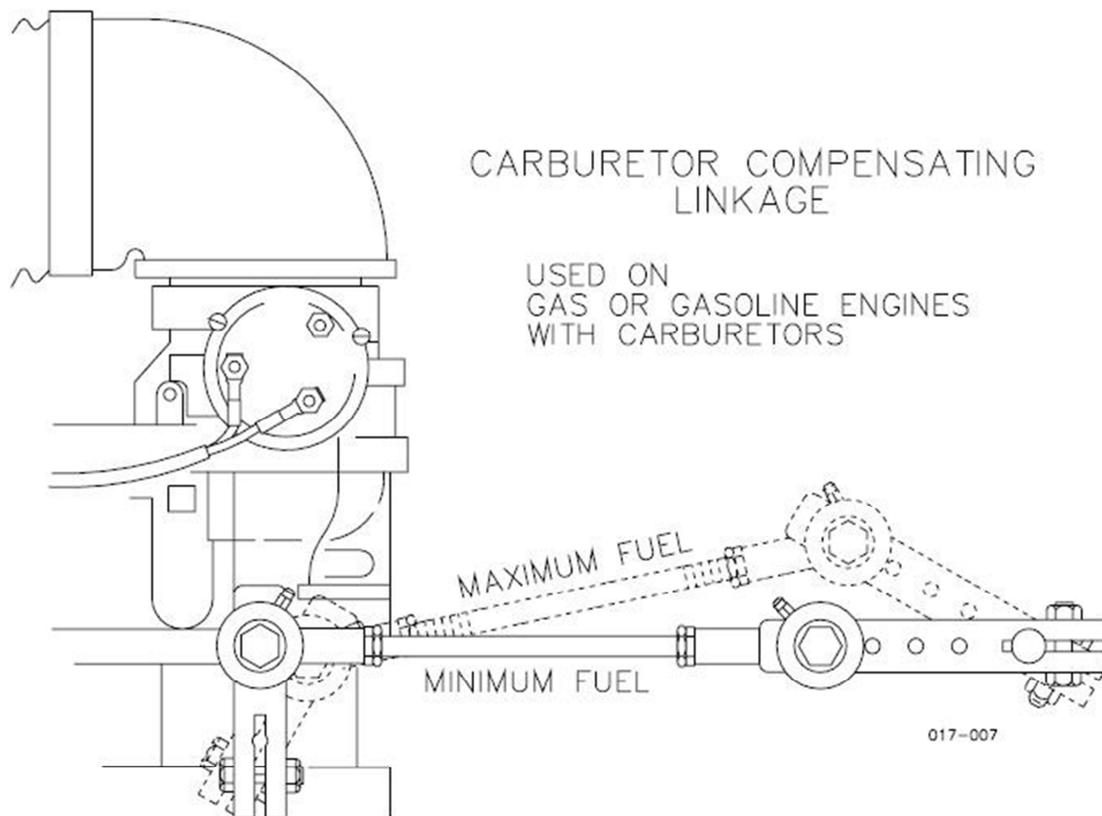


Figura 38: Sistema de Palancas No Lineal

1.6. Accesorios para Reguladores de Velocidad Hidromecánicos

Dentro de los accesorios utilizados en los Reguladores de Velocidad tenemos los siguientes dispositivos:

- Amplificadores Hidráulicos
- Para fijación de Velocidad Remota
- Alarmas y dispositivos para apagado de emergencia
- Limitadores de Combustible

1.6.1. Amplificadores Hidráulicos

Son dispositivos usados donde se necesitan grandes fuerzas para operar mecanismos de control de poder, como válvulas de control de turbinas de vapor o palancas de control de combustible para motores grandes. Los amplificadores hidráulicos son usados en conjunto con Reguladores de Velocidad que tienen una salida mecánica, como los descritos en secciones anteriores, y sirven para amplificar el bajo nivel de fuerza o torque en el eje Terminal del mismo, a un nivel de fuerza mayor útil para aplicaciones específicas.

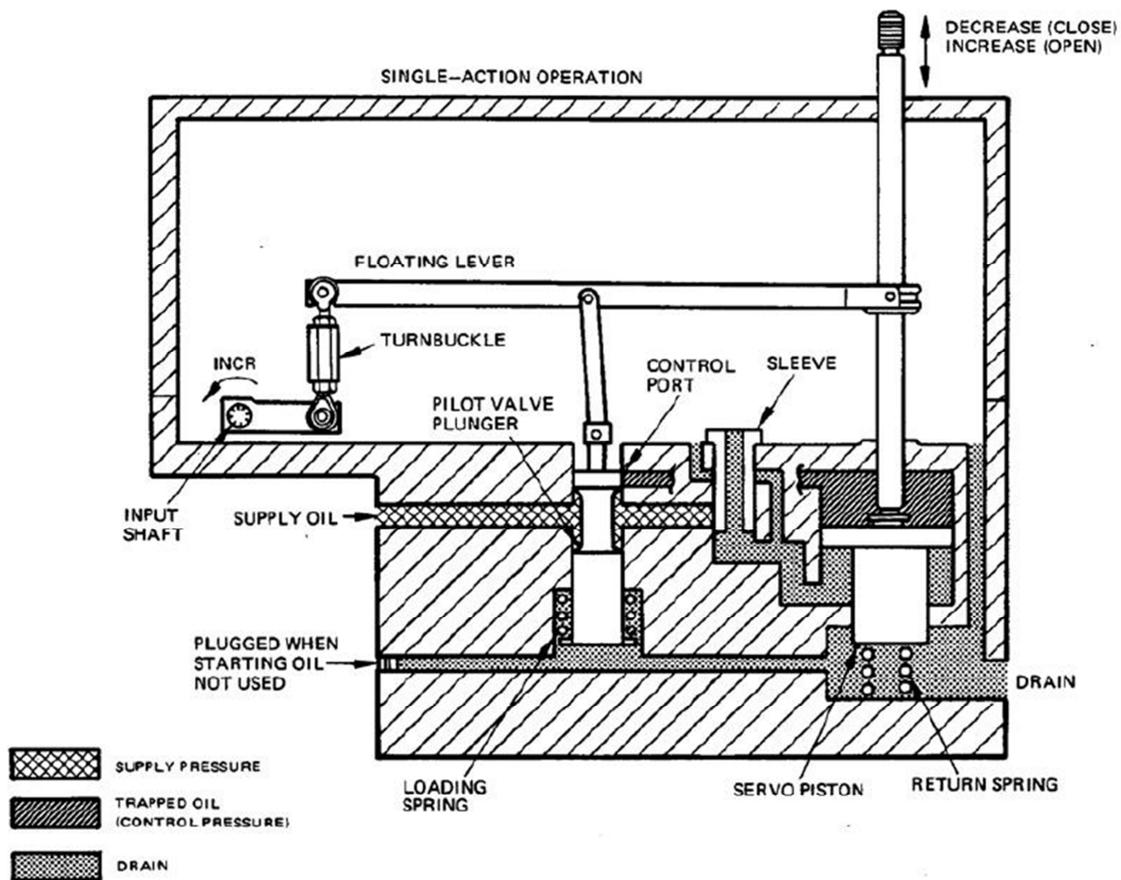


Figura 39: Esquema de un Amplificador Hidráulico con Control Mecánico

En la Figura 39 se puede apreciar el esquema de un Amplificador Hidráulico donde el eje de entrada (Input Shaft) es amplificado con una mayor fuerza en el eje terminal del amplificador hidráulico. Al girar el eje de entrada se mueve la palanca que actúa directamente sobre el émbolo de la válvula piloto, esta al desplazarse verticalmente permite el paso de aceite hacia y desde el pistón de fuerza, permitiendo que este se desplace verticalmente moviendo la válvula de suministro de combustible.

Los amplificadores hidráulicos tienen diferentes entradas de control de acuerdo al tipo de Regulador de Velocidad al que vayan a estar acoplados. Existen amplificadores con controles mecánicos (Figura 39), con control eléctrico, control hidráulico y control neumático. Pero todos cumplen la misma función de amplificar una señal de control a una fuerza o torque útil en una determinada aplicación.

Estos amplificadores pueden llegar a tener un torque en el eje de salida de hasta 45000 lb-pie cuando en su entrada tienen un torque de 3 lb-pie.

1.6.2. Dispositivos para fijación de Velocidad Remota

Son equipos utilizados para poder fijar la velocidad de referencia en el Regulador de Velocidad desde una ubicación lejana a la ubicación física del Regulador de Velocidad. Actualmente con los nuevos Reguladores de Velocidad Electrónicos se pueden realizar configuraciones, ingreso de parámetros, monitoreo, entre otros a través del Internet.

En los Reguladores de Velocidad Mecánicos tenemos dispositivos de fijación de Velocidad remota eléctricos y neumáticos. Estos envían una señal de referencia que de acuerdo al tipo, son transformadas en fuerzas que puedan ser comparadas con la fuerza ejercida por las contrapesas al sensar la velocidad actual del motor para que se pueda enviar la orden que corregirá la velocidad de ser necesario.

Dispositivos eléctricos.- usan un motor con un magneto permanente para aumentar o disminuir, mediante una señal eléctrica, la fuerza sobre el resorte de Fijación de Velocidad variando así la velocidad de referencia en el Regulador de Velocidad.

Dispositivos Neumáticos.- Utilizan una señal neumática de aire la cual ingresa a un fuelle o acordeón acoplado a un resorte de restauración que se contrae o expande de acuerdo a la presión ejercida por el aire. El volumen de este fuelle cambia la posición de un vástago, el cual alivia o aumenta la presión sobre el Resorte de Fijación de Velocidad, variando así la velocidad de Referencia del Regulador de Velocidad.

1.6.3. Dispositivos para Apagado de Emergencia

Son dispositivos que envían una señal al Regulador de Velocidad para que inmediatamente posicionen el eje Terminal en la posición de mínimo suministro de combustible para provocar que el motor se apague. Estos pueden ser accionados manualmente o automáticamente cuando ocurre una sobre velocidad en la unidad o algún fenómeno que pueda causar pérdidas materiales y humanas.

Las protecciones de este tipo más usadas en los Reguladores Mecánicos son las de sobre – velocidad del motor, baja presión de aceite y aquellas operadas por paros de emergencia externos.

Estas operan mediante un solenoide acoplado a un vástago, al ser activado el solenoide, el vástago se dirige hacia abajo y empuja el émbolo de la válvula piloto del Regulador de Velocidad hacia arriba de tal manera que permite que todo el aceite de presión del Pistón de Poder fluya hacia el sumidero de aceite (ver flechas naranjas de la Figura 40), obligando que el eje Terminal se ubique en la posición de apagado del motor como podemos ver en la Figura 40. Estos solenoides pueden ser activados al energizarse o des energizarse de acuerdo a los requerimientos de la aplicación.

1.6.4. Limitadores de Combustible

Evitan que el motor se ahogue por demasiado suministro de combustible al arrancar. Esto se provoca debido a que se sobre pasa el nivel de combustible que se puede quemar en la combustión con la cantidad de aire disponible en ese momento. En los motores a diesel turbo cargados por ejemplo se utiliza la presión de aire generada en el turbo, la cual está en función de la velocidad del motor a cada momento. Este dispositivo limita el movimiento del pistón de poder del Regulador en la dirección de Aumento de suministro de combustible en función a la velocidad del motor. (Ver Figura 40)

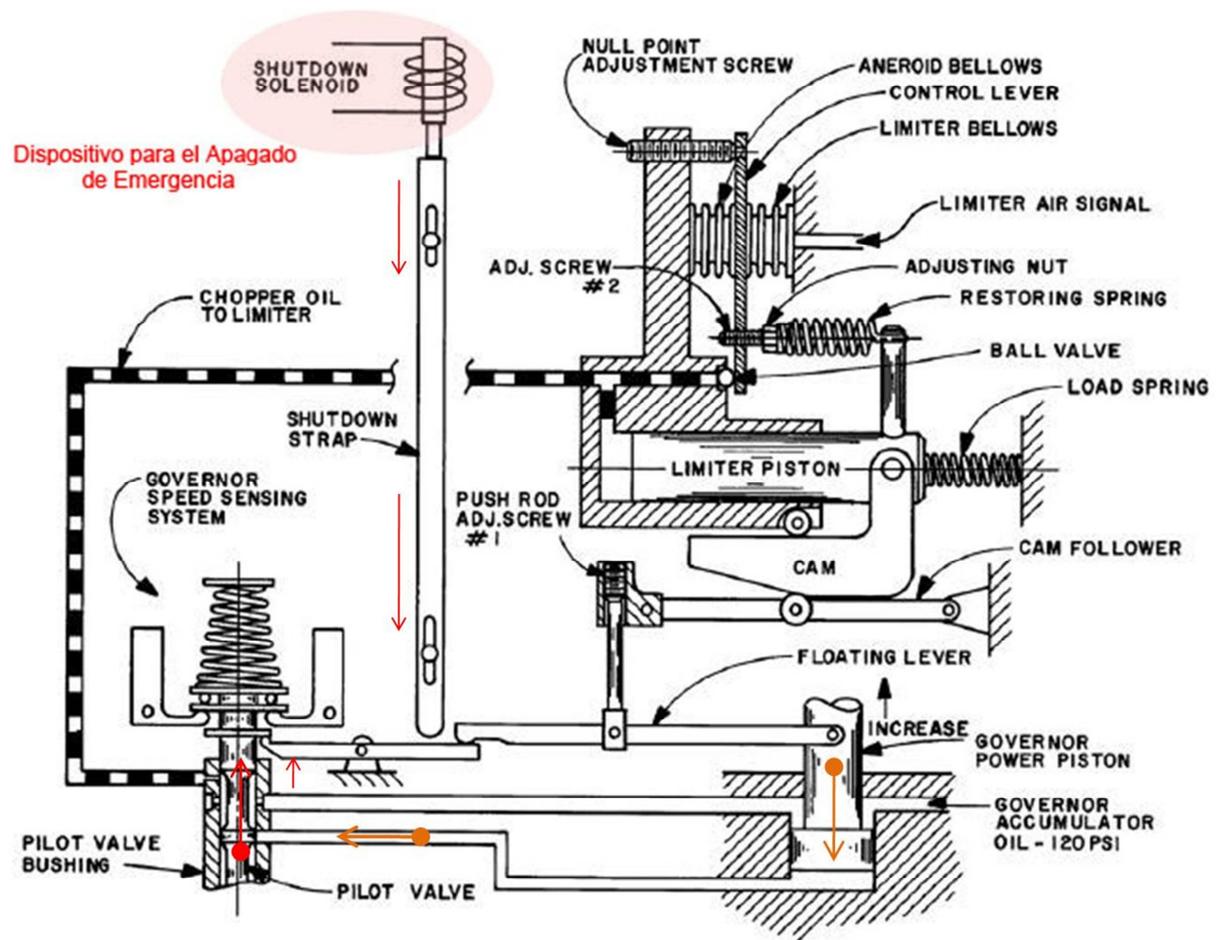


Figura 40: Esquema de un Limitador de Combustible con Presión Neumática

La Figura 40 muestra los componentes principales de un limitador de combustible en un Regulador de Velocidad Mecánico. En la parte superior derecha de la Figura 40 se observa la entrada de aire del limitador de Combustible, el aire que ingresa a cierta presión es acumulado en un fuelle o acordeón (Limiter Bellows). El sistema de fuelles, mediante la palanca, presiona o libera la esfera de la válvula (Ball Valve) de su asiento y permite que el aceite se escape hacia el reservorio o cárter del Regulador de Velocidad. Si la esfera de la válvula permanece en su asiento, el aceite se almacena empujando el pistón del limitador hacia la derecha, este movimiento empuja a la leva (Cam) en el mismo sentido, el perfil de la leva limita el movimiento del eje terminal del

Regulador de Velocidad actuando directamente sobre el émbolo de la válvula piloto del Regulador. Es decir, cuando el pistón del eje terminal se desplaza hacia la posición de mayor combustible, el sistema de barras transmite este movimiento hacia el embolo de la válvula piloto, desplazándolo hacia arriba lo cual permite que el aceite presurizado en el pistón de fuerza se escape hasta el reservorio de aceite, forzando al pistón de fuerza que descienda nuevamente disminuyendo el suministro de combustible.

Por lo tanto, dependiendo la presión de aire presente en los fuelles, el pistón del limitador se desplaza horizontalmente, moviendo la leva del limitador, la leva limitara el movimiento del pistón de fuerza reubicando la válvula piloto, y esta a su vez forzara que el eje terminal regrese a su posición, es decir limitando el suministro de combustible en función de la presión de aire presente en los fuelles.

El aire que se dirige hacia el fuelle del limitador de combustible proviene del turbo cargador del motor de combustión interna. El turbo cargador utiliza el aire del múltiple de escape del motor de combustión interna y mediante un eje solidario y la rueda compresora, absorbe y comprime aire del ambiente y lo dirige hacia las cámaras de combustión del motor, iniciando nuevamente el ciclo de combustión. La presión que va hacia el fuelle del limitador de combustible del regulador de velocidad proviene de la rueda compresora del turbo cargador, este al girar a una velocidad que depende de los gases que salen del múltiple de escape del motor. De tal manera, cuando el motor gira a una velocidad baja, los gases de escape mueven el turbo a una velocidad baja, generando baja presión en la rueda compresora y por lo tanto baja presión en los fuelles del limitador de combustible, limitando el suministro de combustible. Al aumentar la velocidad del motor, la velocidad de los gases de escape aumentan, la presión del aire de la rueda compresora

aumenta, la presión del aire dirigido hacia las cámaras de combustión y fuelle del limitador aumentan, aumentando el rango de acción del pistón de poder hasta llegar a la velocidad de operación nominal, donde el limitador de combustible dejaría de actuar.

Los limitadores de combustible tienen como función garantizar que la mezcla entre combustible y oxígeno disponible para una combustión sean correctas, lo realiza limitando los aumentos de suministro de combustible. Una combustión con demasiado combustible provoca la generación de humo en los conductos de escape del motor y una aceleración lenta del mismo.

2. Modernización de Regulador de Velocidad

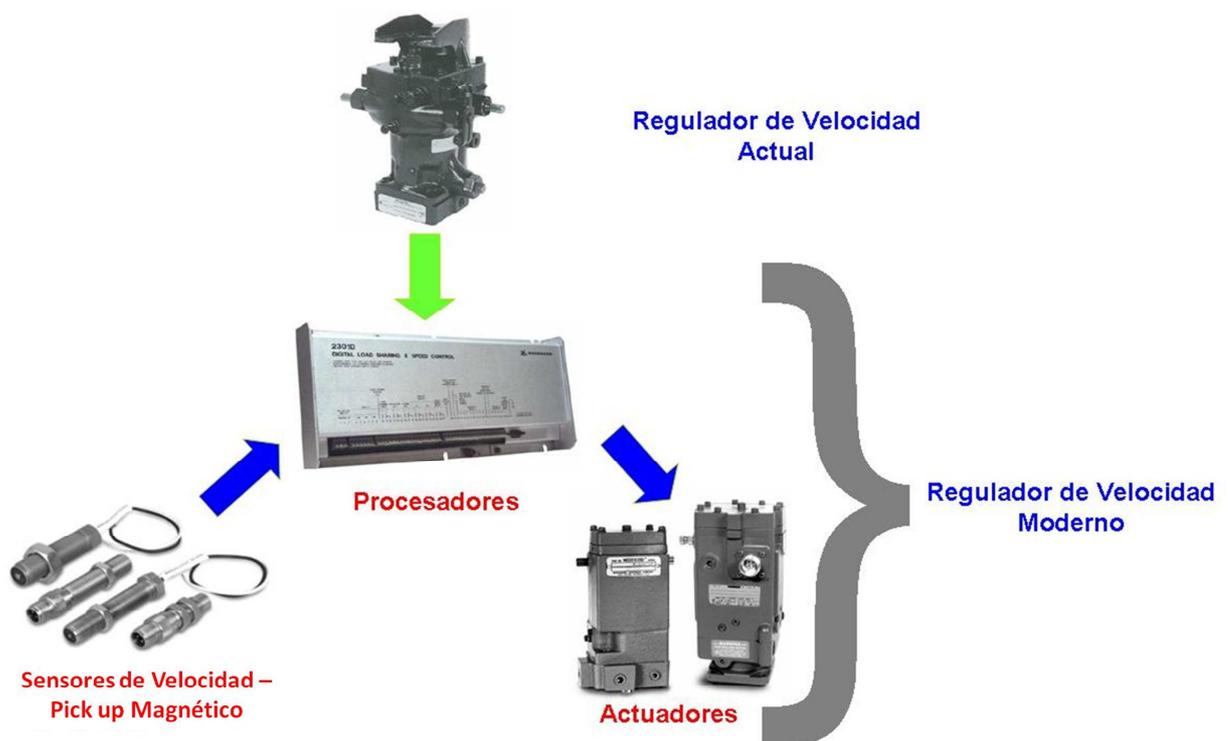


Figura 41: Modernización de un Regulador de Velocidad Hidro Mecánico

Para modernizar un regulador de Velocidad Hidromecánico es necesario utilizar los siguientes componentes (Ver Figura 41).

- Sensor de Velocidad – Pick Up Magnético – MPU.- para medir la velocidad.
- Procesador – Regulador de Velocidad Electrónico Análogo/Digital.- para procesar y definir las correcciones a aplicar.
- Actuador: Electro - Hidráulico o Eléctrico.- para mover el sistema de suministro de combustible.

A continuación se revisaran a detalle estos componentes.

2.1. Reguladores de Velocidad Electrónicos

Luego de haber revisado los principios del Regulador de Velocidad Mecánico vamos a hacer una comparación con los reguladores de velocidad electrónicos, los cuales usan los mismos principios pero con diferente tecnología (Ver Figura 42).

En la Figura 42 se puede observar una analogía entre los principales dispositivos de un Regulador de Velocidad Hidromecánico y los de un control Electrónico.

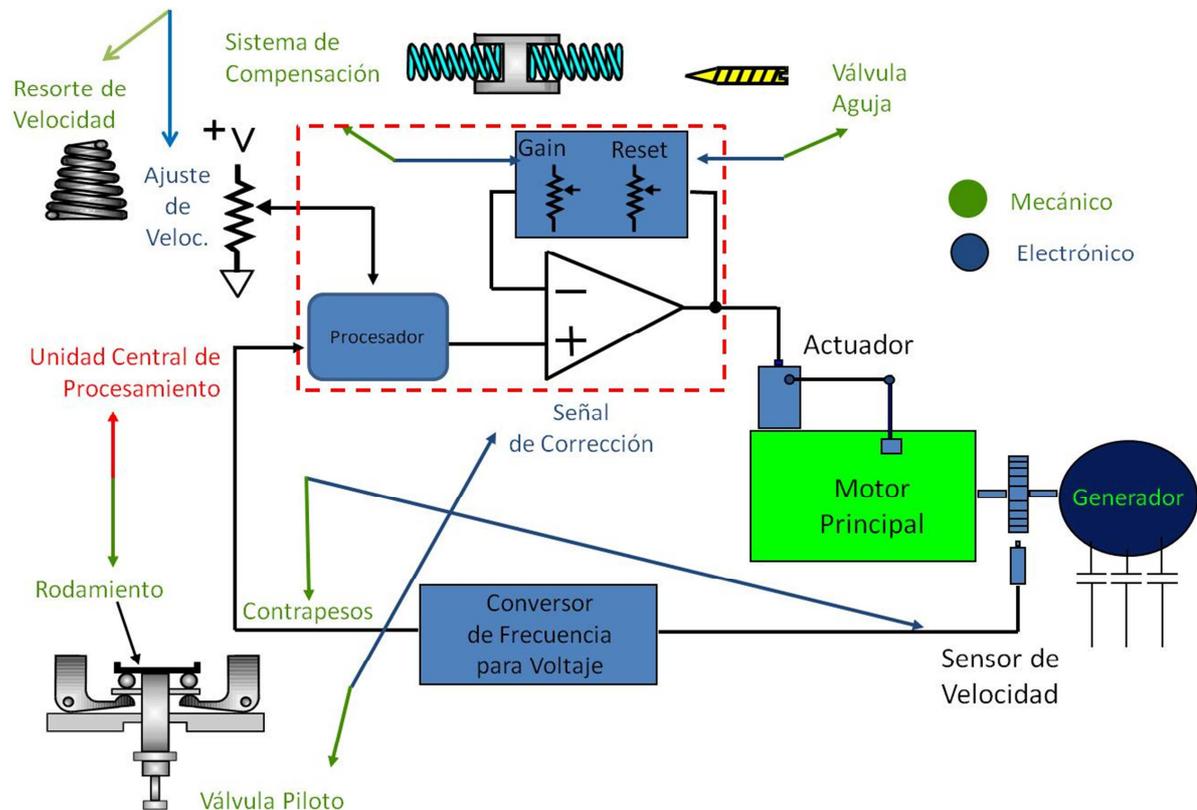


Figura 42: Comparación de dispositivos de Control Mecánico y Eléctrico

En la Figura 42 se pueden observar las siguientes analogías:

Resorte de Fijación de Velocidad deseada – Ajuste electrónico de Velocidad:

mientras en el sistema mecánico se utiliza un resorte para fijar la velocidad deseada, en un sistema electrónico se utiliza una señal de voltaje DC en la entrada de señal de referencia del controlador.

Contrapesas – Sensor de Velocidad:

en el sistema mecánico la fuerza centrífuga de las contrapesas es llevada a ejercer una fuerza hacia el rodamiento donde será comparada con la

fuerza ejercida por el resorte de fijación de Velocidad. En un sistema electrónico la velocidad es medida por un sensor de velocidad inductivo, este sensor emite una frecuencia la cual es convertida en una señal de voltaje DC, la cual será comparada con la señal de voltaje de referencia de velocidad deseada programada en la tarjeta electrónica.

Resorte de Compensación/ Válvula Aguja – constante Integral (reset)/

Contante Derivativa: así como la constante integral y derivativa son mejoras al control únicamente proporcional de los reguladores de Velocidad electrónicos, los resortes de compensación y la válvula aguja son mejoras en el sistema de control de un regulador de velocidad hidromecánico, ya que permiten corregir efectos similares, por ejemplo: las pequeñas oscilaciones de un motor pueden ser corregidas con la válvula aguja del sistema mecánico, mientras que con un sistema eléctrico sería necesario revisar la constante derivativa del sistema.

Rodamiento / Unidad central de procesamiento: mientras que en el regulador de velocidad mecánico las acciones correctivas nacen del rodamiento que está entre las contrapesas y el resorte de fijación de velocidad, comparando las fuerzas verticales que ejercen las mismas en sentido contrario, y por consecuencia moverán el pistón de poder en la dirección necesaria para realizar la corrección de la señal de error. En los reguladores electrónicos se comparan las señales de referencia de velocidad y velocidad sensada o real, para esto estas dos señales se convierten en su valor equivalente en voltaje y comparadas, la señal de error resultante se procesa en la unidad central de procesamiento la cual generara una acción de corrección hacia el actuador.

2.1.1. Referencia de Velocidad

En los controles electrónicos la velocidad de referencia se la fija mediante potenciómetros que varían una señal de voltaje, la cual va a ser comparada con la señal del sensor de velocidad en el punto de sumatoria.

Las tarjetas electrónicas son alimentadas con una fuente de voltaje continuo de 18-32 voltios, usualmente 24 VDC. Con la ayuda de un desarmador se regula la posición del potenciómetro para calibrar la velocidad deseada en el motor (ver Figura 43)

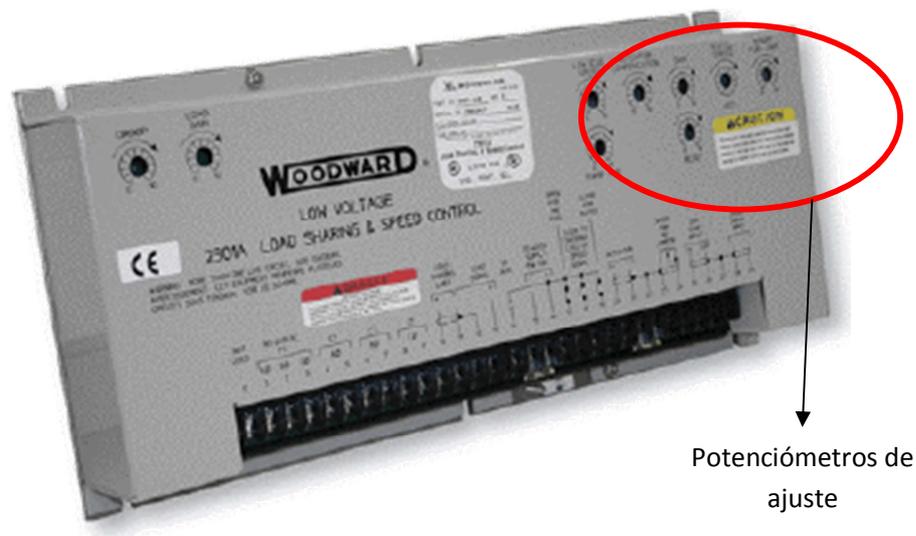


Figura 43: Control de Velocidad electrónico analógico Woodward 2301 A

En los controladores electrónicos digitales (ver Figura 44) todos los parámetros son ingresados por software, mediante el teclado del computador o alguna interfaz Maquina Humano HMI. Esto nos permite tener un control a distancia de la velocidad.

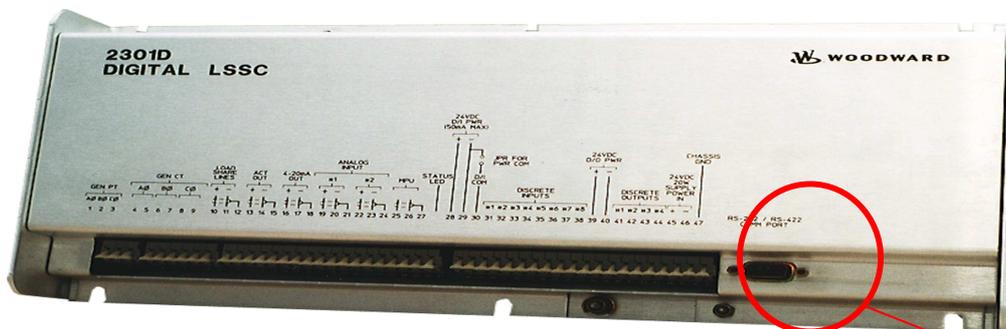


Figura 44: Control de Velocidad Electrónico Digital Woodward 2301D

Puerto de Comunicación para configuración vía PC o sistema remoto

2.1.2. Sensores de Velocidad - Pick Up Magnético (MPU)

Es usado para medir la velocidad del motor. Un circuito es necesario para transformar la señal del sensor a una señal útil para el Regulador de Velocidad. El MPU es un sensor tipo inductivo que produce una señal de salida de voltaje en el momento que cualquier material ferro magnético se mueve a través del campo magnético del sensor de velocidad. Normalmente son instalados con dirección radial a cierta distancia de los engranajes del eje principal del motor. Si no se tiene acceso a estos engranajes, es necesario instalar una rueda dentada de un material ferro magnético, como el acero o hierro (por sus propiedades magnéticas) en el eje principal del motor.

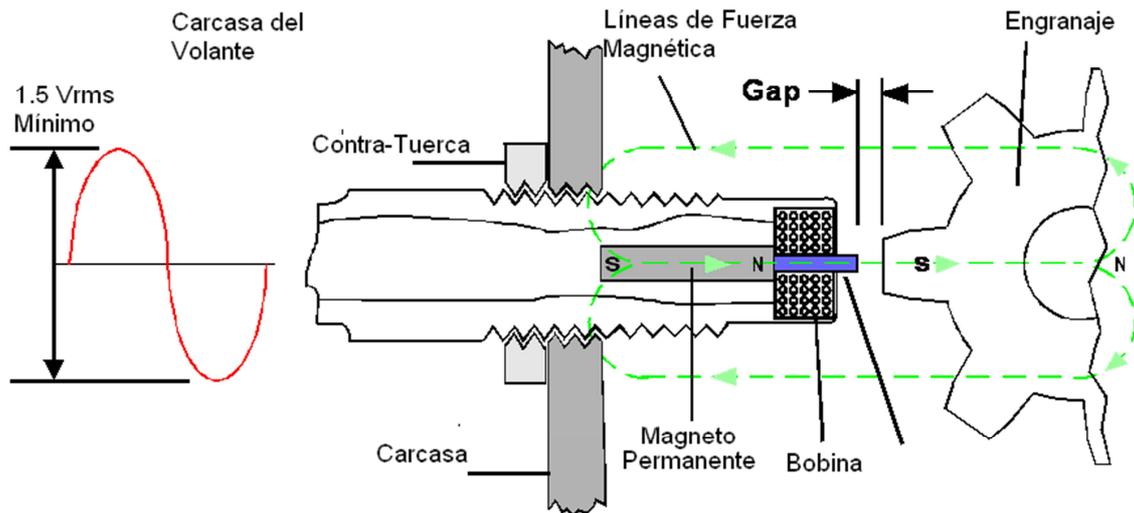


Figura 45: Pick up Magnético

En la Figura 45 puede observarse el campo magnético generado por el magneto permanente. Cuando los dientes de la rueda dentada cruzan por el campo magnético se genera una onda sinusoidal mostrada en la parte izquierda de la Figura 45.

Un dispositivo que produce discontinuidad de material ferro magnético en el campo del sensor de velocidad, producirá un voltaje eléctrico. Es así que el diseño de las ruedas dentadas a instalarse puede ser variable siempre y cuando cumplan su objetivo de variar el campo magnético del MPU de acuerdo a las dimensiones mostradas en la Figura 46.

Las dimensiones mínimas de los dientes de los engranajes de los cuales van a ser sensados se muestran en la Figura 46.

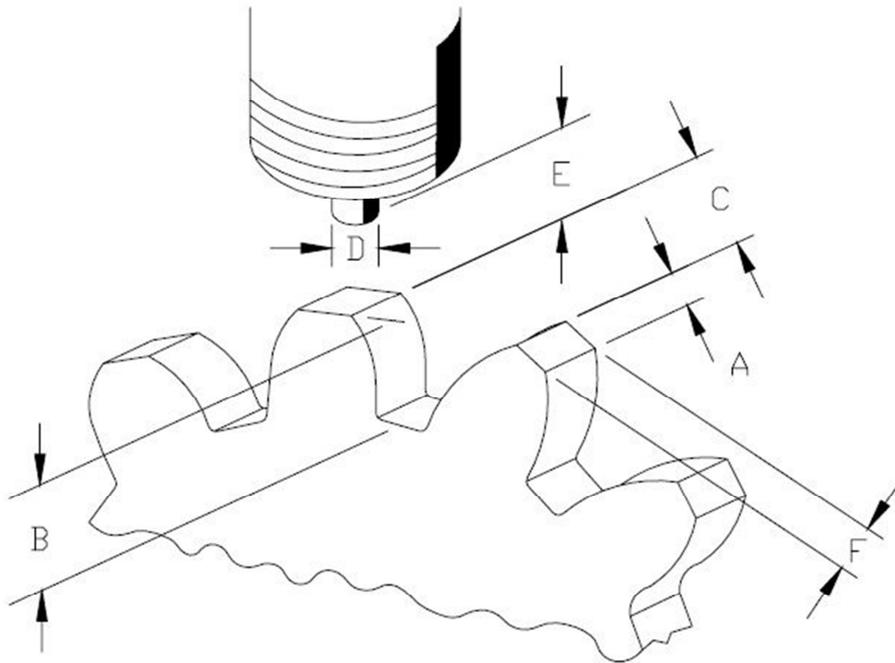


Figura 46: Dimensiones de MPU y Engranaje

Donde:

A es la dimensión de cresta del diente

B es la altura del diente

C es el espacio entre dientes

D es el diámetro del polo magnético

E es la distancia entre la cresta del diente y el polo magnético.

F es el espesor del diente

A debe ser igual o más grande que D

B debe ser igual o más grande que C

C debe ser igual o 3 veces más grande que D

F debe ser igual o más grande que D

La salida de voltaje generada en el MPU está afectada por tres factores:

- El voltaje aumenta cuando aumenta la velocidad de la superficie del material monitoreado. La salida máxima de voltaje a cualquier velocidad o distancia entre el MPU y la rueda, será cuando exista una masa relativamente grande de material magnético en un instante y una completa ausencia de este material en el siguiente.
- El voltaje decrece si aumenta la distancia entre el MPU y la superficie del diente del engranaje.
- La forma de onda del voltaje es determinada por el tamaño y forma del diente del engranaje relacionado con el tamaño y forma de polo magnético del MPU.

Estas condiciones se cumplen cuando la sección transversal de la masa cortante (dientes) es igual o más grande que el polo magnético del MPU y el espacio entre los dientes es igual o más grande también, ver Figura 46.

El Sensor de velocidad detecta los cruces por cero de la onda de voltaje formada por el mismo, una vez en sentido positivo y otra en sentido negativo (ver Figura 47). Si la onda tiene más de un cruce por cero detectará una velocidad equivocada. Es por eso que el diseño del perfil de la rueda

dentada es muy importante para garantizar que la velocidad detectada sea la correcta (ver Figura 48).

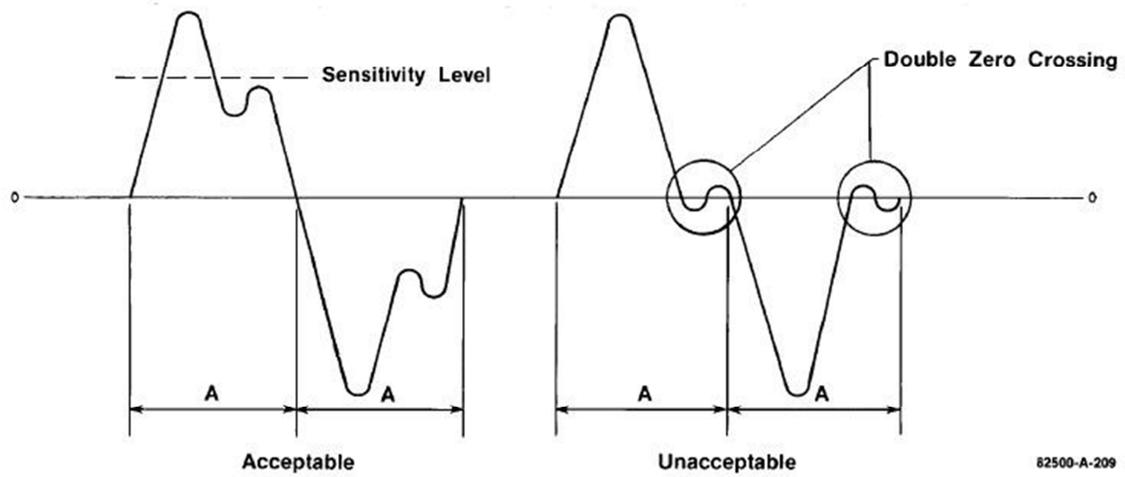


Figura 47: Formas de Onda del MPU

Dependiendo del perfil del diente de la rueda dentada podemos tener diferentes formas de onda (ver Figura 48)

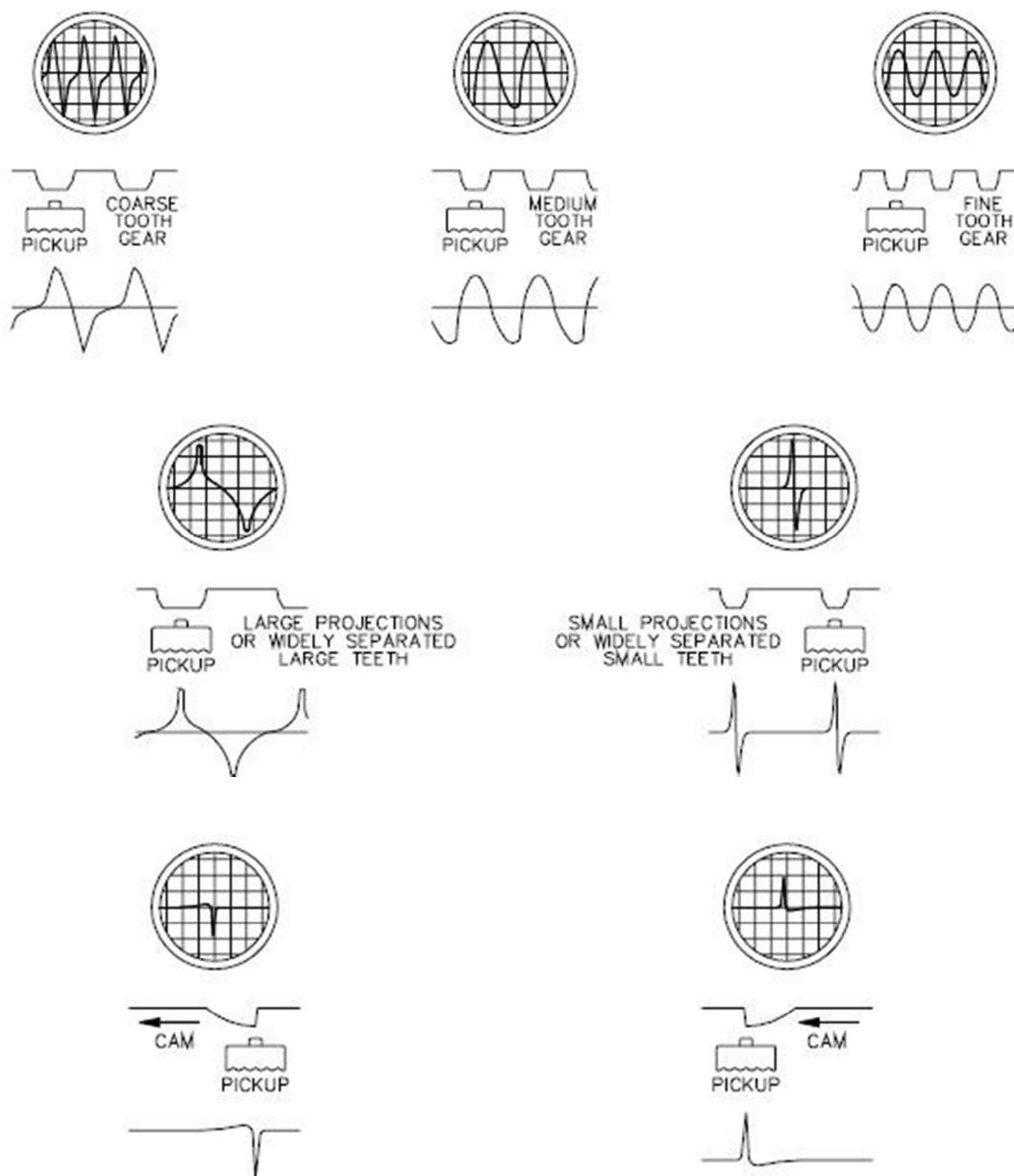


Figura 48: Perfiles de Dientes y sus respectivas formas de Onda del MPU

Una forma de onda aceptable de los ejemplos de la Figura 48 es la ubicada en la esquina superior derecha, una onda sinusoidal.

La frecuencia generada por el sensor de velocidad es proporcional a la velocidad de la unidad motriz. Para determinar la velocidad de la unidad motriz a partir de la frecuencia del sensor de velocidad, es necesario conocer el número de dientes del volante donde se está sensando la velocidad. Con estos datos aplicamos la siguiente fórmula.

$$RPM_{Gear} = \frac{(Hz_{MPU})(60)}{\# \text{ de dientes}}$$

Ecuación 2

$$\frac{\text{Revoluciones}}{\text{min}} = \frac{\left(\frac{1}{\text{seg}}\right)\left(\frac{\text{seg}}{\text{min}}\right)}{\frac{\# \text{ de dientes}}{1 \text{ Revolución}}}$$

Es necesario ingresar el número de dientes de la rueda dentada donde está ubicado el sensor de velocidad en el Regulador de Velocidad electrónico, los Hz son medidos directamente mediante el MPU.

2.1.3. Unidad Central de Procesos

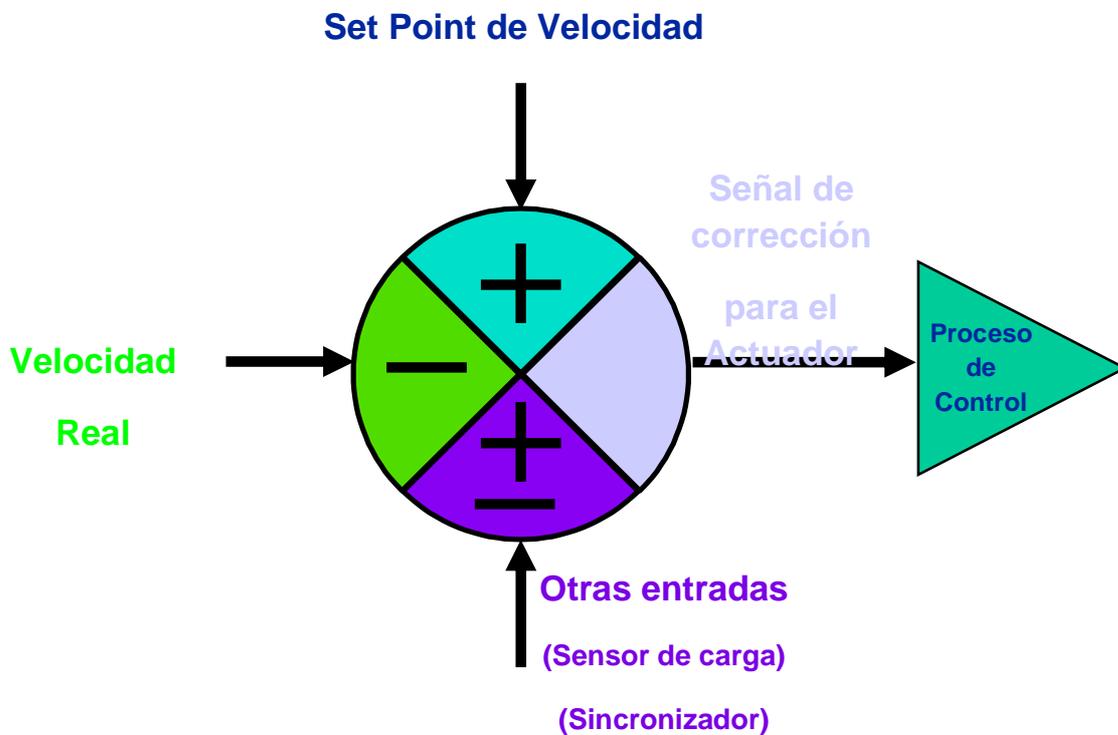


Figura 49: Unidad Central de Procesamiento

La señal proveniente del sensor de velocidad es convertida a una señal de voltaje DC, la cual, indica la velocidad actual de la unida motriz. Esta señal es comparada con el Set Point de velocidad deseada (diferencia de Voltaje DC). Si la velocidad actual es diferente a la deseada (señal de error), se generara una acción correctiva enviada hacia el Actuador.

Cuando la suma de las señales es cero y permanece constante en el tiempo, no se generara ninguna señal correctiva, manteniendo la misma señal de corriente hacia el actuador.

En sistemas más complejos en esta Unidad Central de Proceso, se adicionan las señales de sensores de carga, sincronizadores y otros dispositivos para tomar acciones correctivas en la regulación de velocidad.

2.1.4. Modos de Control

Los modos de control comúnmente usados en los reguladores de Velocidad electrónicos son:

- ❖ ON – OFF
- ❖ Proporcional
- ❖ Integral
- ❖ Derivativo.

Dependiendo del proceso que se desea controlar, existen algunos modos de control disponibles. Por ejemplo el modo ON – OFF es adecuado para el sistema de calefacción y aire acondicionado de una habitación pero presentaría resultados poco satisfactorios en aplicaciones químicas o donde se usen derivados del petróleo, como podemos analizar a continuación.

2.1.4.1. Modo ON – OFF

Un ejemplo para entender este tipo de control es el encendido y apagado del aire acondicionado automático en un vehículo, departamento u oficina, en donde fijamos la temperatura de referencia la cual es comparada con la temperatura real sensada, para corregir el error de la temperatura se prende el Aire acondicionado hasta llegar a bajar la temperatura sensada bajo el valor de referencia. En ese momento se apagará el aire acondicionado hasta que la temperatura vuelva a subir sobre la referencia, inmediatamente se volverá a encender el aire para disminuir la señal de error.

2.1.4.2. Control Proporcional

Para explicar este tipo de control, vamos a tomar como ejemplo la boya que controla el flujo de agua al reservorio de un inodoro. El nivel de agua de referencia es con el tanque lleno. Al estar el tanque vacío la señal de error es muy grande por lo que la boya abrirá completamente el flujo de agua, al ir subiendo el nivel y por lo tanto disminuyendo la señal de error, la boya cerrará poco a poco el flujo de agua hasta llegar a cerrar completamente el momento de llevar al nivel de referencia del tanque de agua.

La respuesta proporcional es una constante que actúa directamente sobre la señal correctiva de manera proporcional a los cambios de la señal de error. En otras palabras es una constante que se multiplicaría por el valor del error para corregir la desviación. Si la señal de error es muy grande, la acción correctiva cambiará significativamente, en el mismo caso si es pequeña, la señal correctiva será mínima.

La variable proporcional elimina las características cíclicas del modo ON – OFF, un ejemplo del uso del control proporcional, es un regulador de velocidad mecánico.

Cuando tenemos un valor proporcional alto, tenemos una reacción rápida, puede producir un pico de sobre velocidad como podemos ver en la Figura 50.

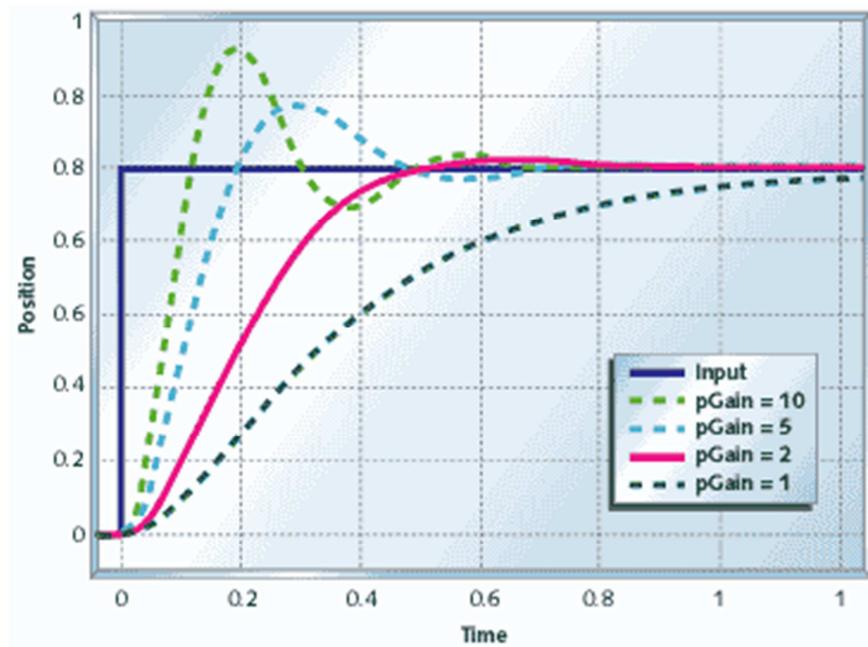


Figura 50: Constante Proporcional

2.1.4.3. Integral

La respuesta integral proporciona una respuesta adicional a la proporcional, está en función no solo de la magnitud de la desviación, sino también, de su duración. Permanecerá activa mientras la diferencia entre la velocidad deseada y la actual este presente. La variable integral reduce el “offset” que se presenta entre el valor de referencia y el valor sentido.

La acción integral puede aumentar la respuesta proporcional en función del tiempo de duración de error entre la velocidad actual y la deseada como podemos ver en la Figura 51.

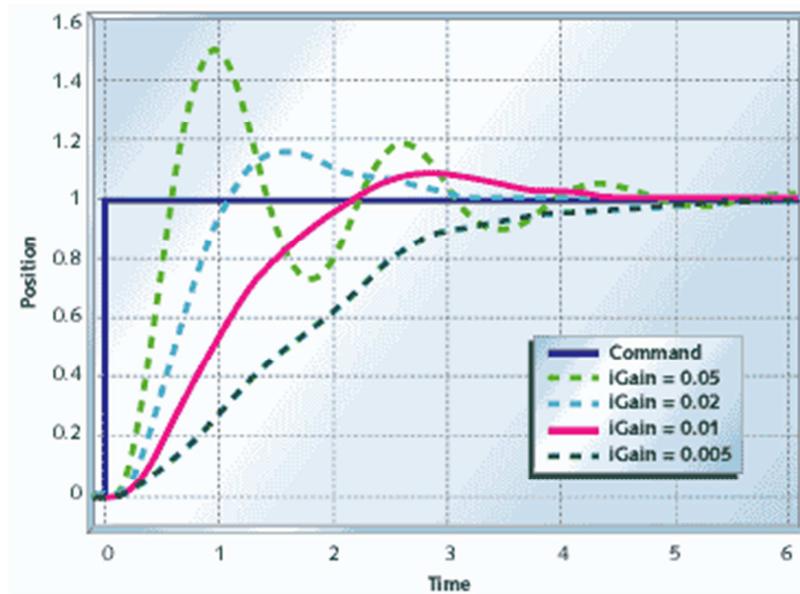


Figura 51: Constante Integral

2.1.4.4. Derivativa

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral).

La acción de la constante derivativa se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. La acción de esta constante es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión a la variable controlada.

El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones, esto se puede mirar en la Figura 52.

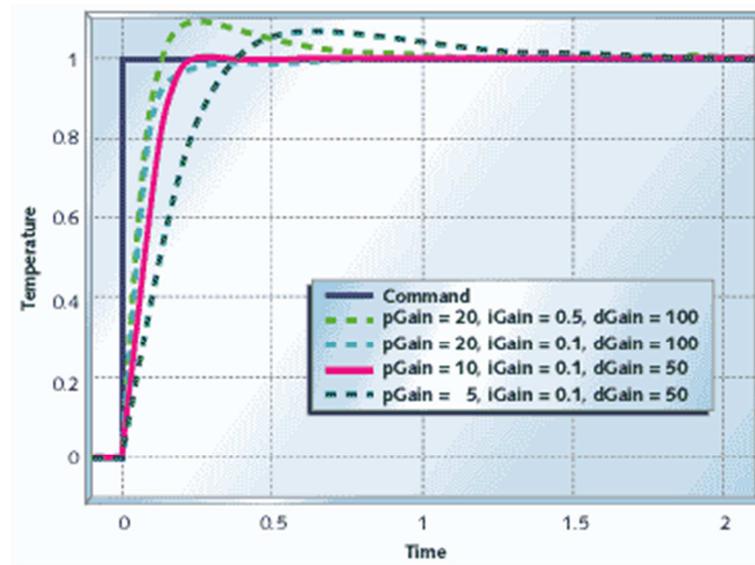


Figura 52: Constante Derivativa

Las variables derivativa e integral son afinamientos de la variable proporcional y trabajan siempre junto a esta.

En los controles digitales se han integrado las tres variables de control y diferentes combinaciones de las mismas para lograr la estabilidad del sistema.

2.2. Actuadores

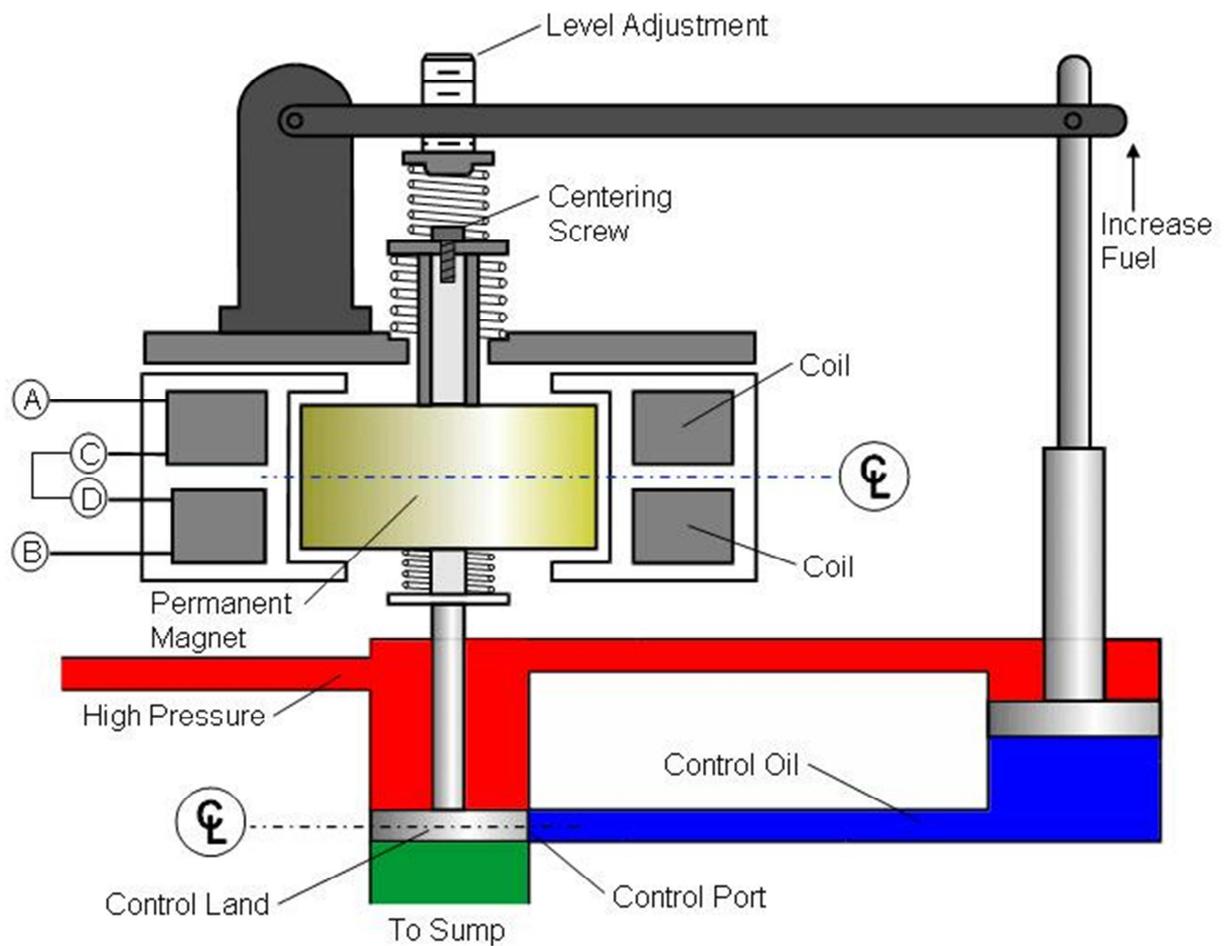


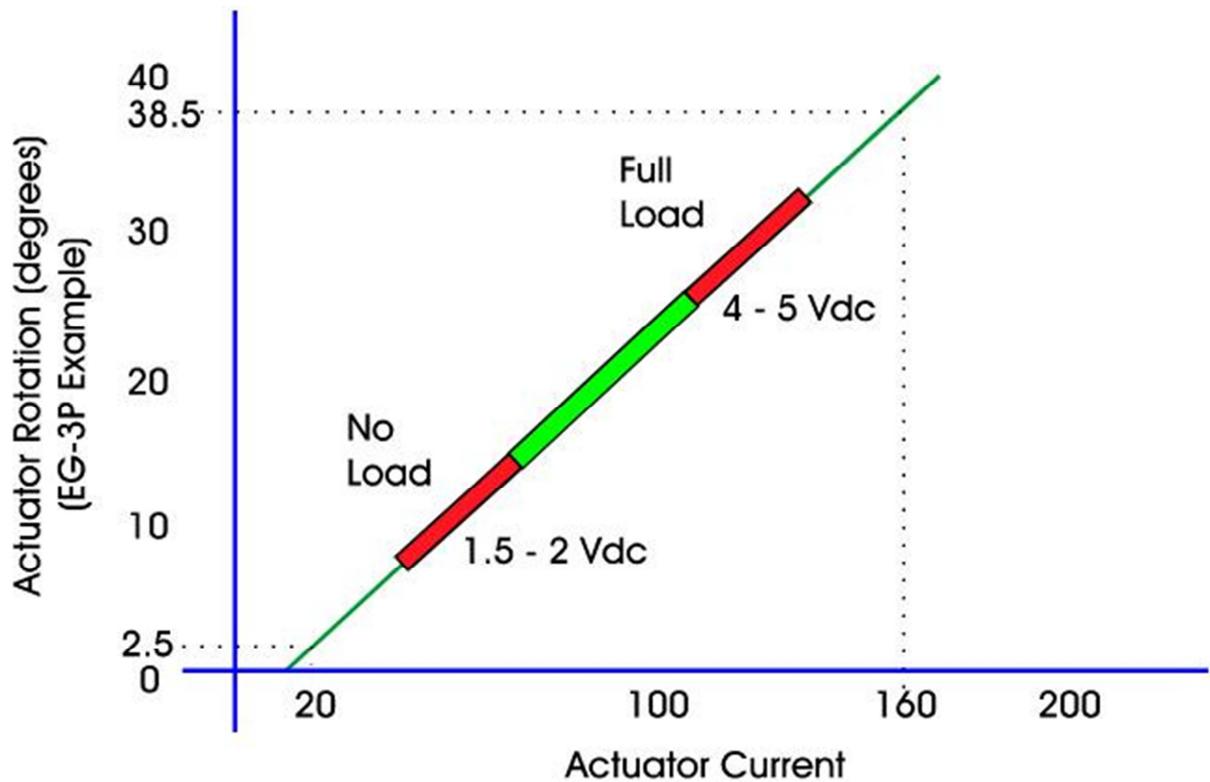
Figura 53: Esquema de un Actuador Hidro - Eléctrico

En la Figura 53 podemos observar un esquema típico de los componentes de un actuador proporcional electromecánico.

La señal eléctrica de entrada alimenta una bobina, ubicada en el interior del actuador, el cual a su vez genera un campo magnético que posiciona un ferro magneto permanente en relación al valor de la corriente que circula por las bobinas.

El magneto permanente esta acoplado a la válvula piloto, esta está centrada en un buje con orificios que permiten o bloquean el paso de aceite hacia o desde el pistón de fuerza. De esta manera la corriente de entrada se convierte en una posición lineal del pistón de fuerza y de acuerdo al mecanismo interno del eje terminal del actuador, en un ángulo de posición en el eje Terminal, este mediante el sistema de varillaje y a la bomba de inyección o válvula de suministro de combustible, corrige la velocidad del motor.

La posición del Eje Terminal del actuador (ángulo de rotación) es proporcional a la señal eléctrica en la entrada del mismo. La señal eléctrica es enviada por el Regulador de Velocidad electrónico, esto podemos observar en la Figura 54.



* Voltage varies slightly with temperature.

Figura 54: Relación entre la señal eléctrica de entrada y la rotación del eje Terminal del actuador

El tipo de entrada eléctrica en los actuadores puede variar de acuerdo al equipo de control y al tipo de actuador, ejemplo: 0 – 20mA, 20 – 160mA, 0 – 5V, etc.

Es así que si se utiliza una señal de 20 – 160mA como la de la Figura 54, una señal de 20mA equivale a un ángulo de rotación de 2.5 grados en el eje Terminal y una señal de 160mA equivale a 38.5 grados de rotación en el eje Terminal del actuador.

En una posición de 0 grados en el eje Terminal del actuador equivale a la posición de apagado en la bomba de inyección o en la válvula de suministro de combustible y por lo tanto la unidad motriz estaría apagada también. Esto asegura que si un fallo se presenta (Ejemplo: falla en

la alimentación de la tarjeta de Regulación de Velocidad o corte en los cables de las señales de control) la señal a la entrada del actuador será de 0mA lo que apagará de inmediato el motor. La señal de un botón de parada de emergencia o de un equipo de apagado de emergencia puede ser usada para cortar la señal de control hacia el actuador en caso de ser requerido para apagar el motor de manera inmediata.

La presión de aceite necesaria para mover el eje Terminal del actuador es generada en una bomba de piñones interna que esta acoplada al eje del motor, en la Figura 55, se puede observar esta bomba en la parte inferior, los engranajes al girar llevan el aceite hacia las cámaras de pistón acumulador. Esta bomba funciona de manera similar a la de un Regulador de Velocidad Hidro – Mecánico.

La señal de control excita las bobinas y reubican el núcleo magnético desplazando de arriba abajo el embolo de la válvula piloto. De igual manera que el regulador de velocidad mecánico, el desplazarse el émbolo de la válvula piloto permite el paso de aceite hacia el pistón de poder desplazándolo hacia arriba o abajo, y por consecuencia girando el eje terminal del actuador el cual mediante es sistema de varillaje aumentaran el suministro de combustible en la bomba de inyección o válvula de suministro de combustible.

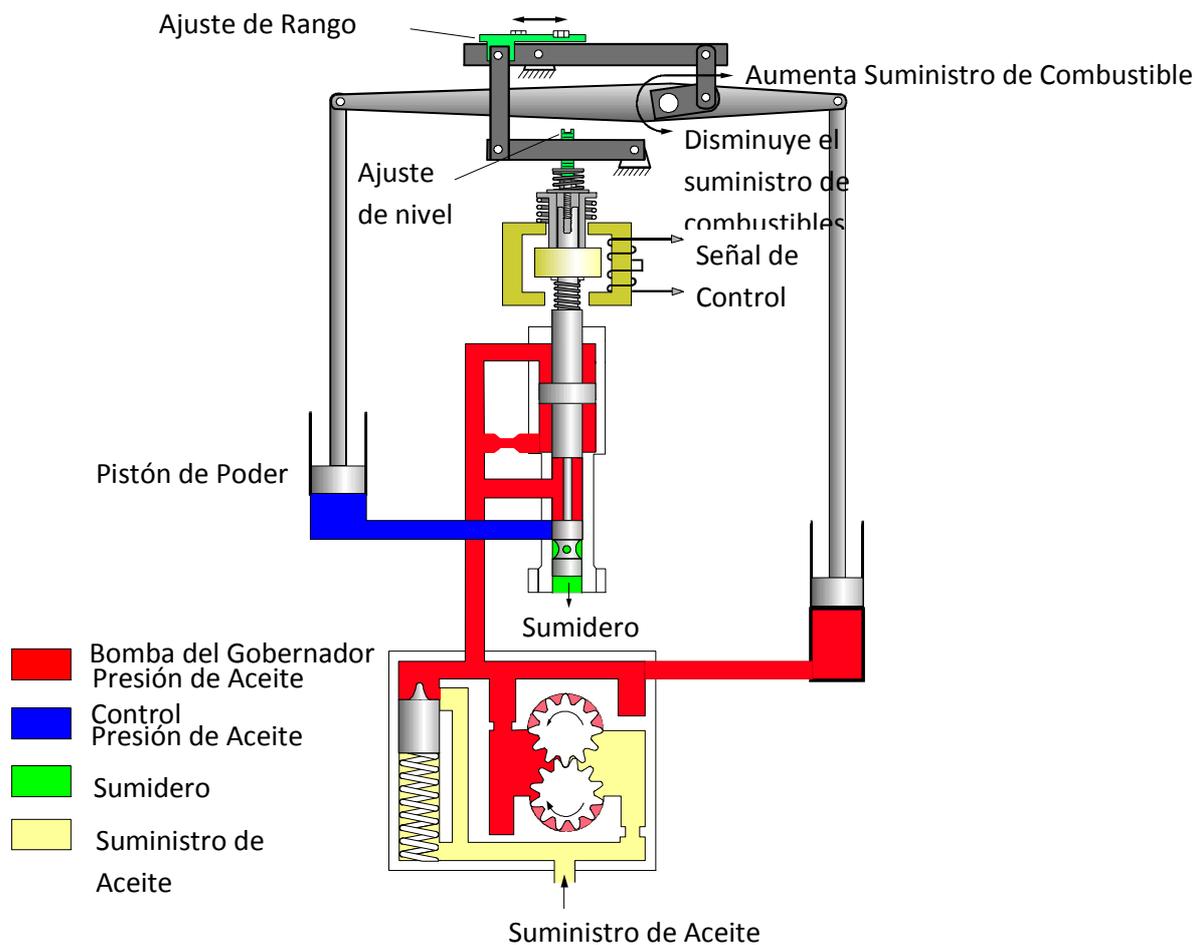


Figura 55: Esquema de un Actuador con bomba de aceite interna

De acuerdo a la configuración específica de cada motor, hay que tener cuidado si la acción debe ser directamente proporcional o inversamente proporcional (acción reversa) a la señal de entrada, es decir, hay actuadores que al aumentar la corriente en la señal de control aumentan su ángulo en el eje terminal (20mA equivalen a 2 grados u 160mA equivalen a 36 grados); y hay también actuadores donde al aumentar la señal de corriente, disminuyen su ángulo en el eje terminal (20mA – 36 grados y 160mA equivalentes a 2 grados). Si se instala un actuador equivocado, puede producir que el motor se sobre revolucione o que el motor nunca se encienda.

2.3. Protecciones Mecánicas para una unidad motriz

En sistemas industriales y en general todos los lugares donde existan unidades motrices en operación debemos considerar incorporar las siguientes protecciones como requisitos mínimos durante la operación de las mismas, protecciones de:

- ❖ Sobre velocidad
- ❖ Baja presión de aceite
- ❖ Baja presión de agua de enfriamiento
- ❖ Alta temperatura
- ❖ Falla en el suministro de combustible
- ❖ Falla en el encendido: puede utilizar presión de aire generada por compresores, mediante un motor eléctrico, etc.

El regulador de Velocidad Electrónico tiene un número de entradas y salidas análogas y digitales configurables que se pueden usar para distintos propósitos. Depende de la configuración específica y requerimientos del sistema, el determinar su uso. Es así, que si se conecta un sensor de temperatura en una entrada análoga, la cual esta sensando la temperatura del motor o de un cojinete, rodamiento, etc. Se puede fijar los parámetros de operación, de alarmas y de apagado en caso de emergencia. Si, de la misma manera se configura una salida discreta para que energice una sirena, cuando la entrada análoga alcanza un valor mayor al valor fijado de operación, se tendrá una alarma sonora para temperaturas altas en el motor o en cualquier parte del motor en la cual estemos midiendo la temperatura.

Es recomendable tener un sistema de protección independiente al de regulación de velocidad. Este cumplirá un papel redundante, lo cual protegerá los equipos en caso de producirse una falla.

Protección de Sobre velocidad: Existen equipos especializados en protecciones de sobre velocidad, los cuales usan la señal de 3 sensores de velocidad para garantizar un control redundante y muy seguro de un sistema. Esto es necesario en sistema como turbinas o motores donde es muy fácil que el motor se embale y produzca pérdidas humanas y materiales. En la Figura 56 se puede observar un esquema básico para un equipo de protección de sobre velocidad triple redundante.

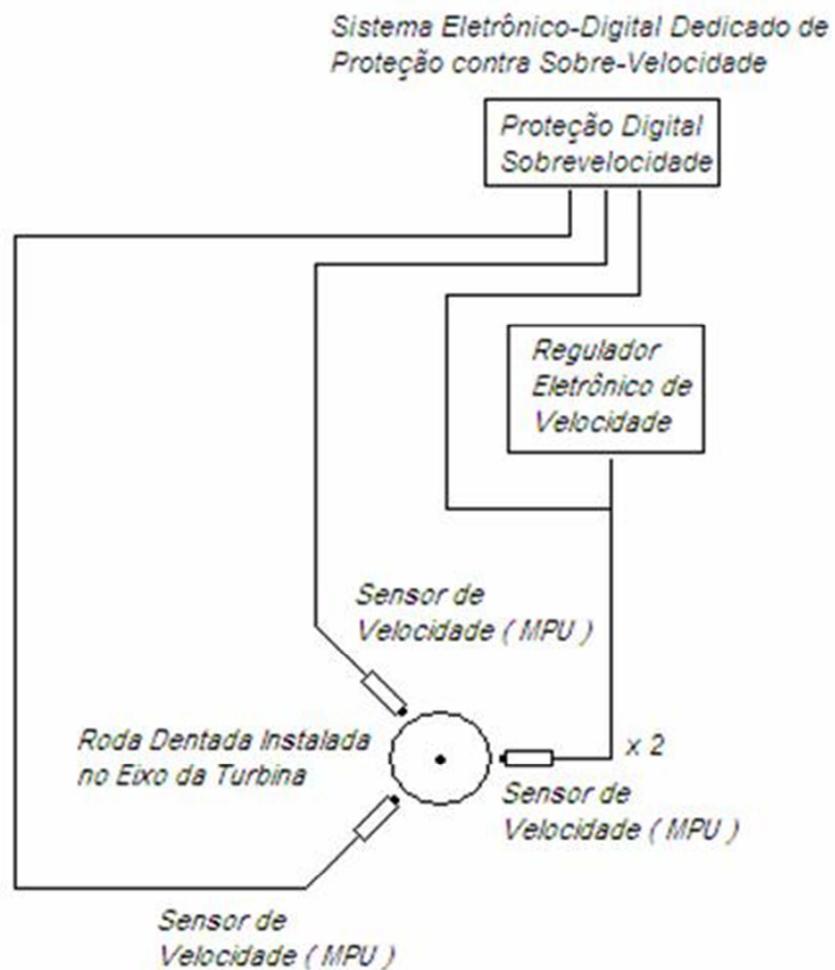


Figura 56: Esquema para un sistema de protección de sobre velocidad

Las protecciones de alta temperatura, baja presión de aceite, baja presión de agua, etc. Se las puede configurar en las entradas análogas de un Controlador Lógico Programable PLC y emitir una señal a una entrada discreta del Regulador de Velocidad Electrónico para que este apague el motor o emita una señal de alarma general en el sistema.

La programación de un regulador de Velocidad electrónico se la realiza con la ayuda de un computador y software proporcionado por el fabricante.

3. Análisis y estudio de parámetros para seleccionar el sistema de regulación de velocidad electrónico.

Para la selección del nuevo sistema de regulación de velocidad, el cual reemplazará el sistema Hidromecánico hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

3.1. Condiciones Físicas

Dentro de las condiciones físicas y operativas que hay que tomar en cuenta para escoger un nuevo sistema de regulación de velocidad son las siguientes:

3.1.1. Dimensiones

Las dimensiones a tomar en cuenta son:

- Eje Terminal
 - **Dimensiones, forma y tipo.**- el eje terminal viene especificado por su diámetro, largo, tipo: cuadrado o redondo (estriado, rosca o pasador), número de estrías.
 - **Ubicación.**- el eje terminal puede estar ubicado a la derecha, izquierda o ambos lados del regulador de velocidad o actuador.
 - **Altura.**- determina la posición del sistema de varillaje donde se acoplará el nuevo actuador con su respectivo eje terminal.

3.1.2. Torque

El torque del nuevo regulador de velocidad o actuador tiene que ser igual o mayor al torque del regulador antiguo. Un torque bajo podría impedir que el nuevo sistema realice acciones de control ya que no serían capaces de posicionar el varillaje de acuerdo a las acciones de control requeridas.

3.1.3. Rango de Revoluciones

El rango de revoluciones en el nuevo actuador determina la capacidad de generar presión de aceite en los mecanismos internos del nuevo actuador. Es decir, una de las ventajas de los nuevos actuadores es que con bajas revoluciones en su eje de transmisión son capaces de llenar las cámaras de los acumuladores llegando rápidamente a la presión de trabajo y permitiendo ejercer acciones de control desde el arranque mismo del motor.

3.1.4. Relación de revoluciones del motor y la rueda dentada donde se encuentra el Sensor de velocidad

Esta relación permite programar el regulador de velocidad electrónico en relación a la velocidad sensada. Es importante determinar si la velocidad sensada es la misma velocidad del motor o existe una relación de reducción o multiplicación de revoluciones.

3.1.5. Suministro de aceite

La entrada para el suministro de aceite del regulador de velocidad puede estar ubicada en su base o en una de sus paredes laterales. Es importante identificar que la ubicación del regulador de velocidad nuevo tenga la misma posición de entrada del regulador de velocidad antiguo, o en su defecto realizar las modificaciones respectivas en el sistema oleo hidráulico de alimentación de aceite externa al nuevo regulador.

3.1.6. Angulo de Rotación del Eje Terminal

La mayoría de reguladores de velocidad mantienen el mismo ángulo máximo de rotación del eje terminal (ítem 11 de la Figura 33). Este ángulo aumenta en sentido de aumentar el suministro combustible, es decir 2° representan por ejemplo el suministro de combustible para mantener el motor a velocidad nominal al vacío y 32° representa el suministro de combustible necesario para mantener la velocidad del motor a full carga. Es necesario confirmar que se mantenga este ángulo máximo de operación con el nuevo actuador para poder así operar y para tener un control apropiado del motor en todo su rango de velocidad.

3.1.7. Tipo de ambiente y ubicación del nuevo regulador de velocidad.

Muchos reguladores de velocidad actuales pueden trabajar también en ambientes explosivos. En muchas industrias se exigen que todos los equipos sean a prueba de explosión, pero existen ciertas ubicaciones dentro de estos ambientes donde no es

necesario este tipo de requerimiento puesto que el modulo que lo alberga cumple con esta característica.

3.2. Condiciones eléctricas

Al cambiar de sistemas mecánicos a electrónicos hay que considerar la necesidad de una fuente de energía eléctrica para la alimentación de la tarjeta electrónica de regulación de velocidad y del actuador, si el tipo aplicado requiere alimentación adicional.

La fuente de alimentación más utilizada en sistemas de Control es de 24 VDC. Estas pueden ser alimentadas por baterías o fuentes de acuerdo a la necesidad.

4. Implementación de un Regulador de Velocidad Electrónico en un banco de pruebas.

4.1. Objetivos

Los objetivos de esta sección son:

- Simular el lazo del control de velocidad con un equipo digital.
- Comprobar la acción y efecto de cada una de las variables de control en un sistema PID (Proporcional, integral y Derivativo).
- Identificar las ventajas de un sistema de control Electrónico Digital.
- Configurar la estabilidad del sistema de regulación de Velocidad 2301D
Load Sharing and Speed Control

4.2. Lista de Materiales

Para demostrar el circuito de acción de un regulador de velocidad se utilizaran los siguientes equipos:

- Regulador de Velocidad Electrónico - Woodward 2301 D Load Sharing and Speed Control NP: 8272-140 NS: 15562091
- Simulador de un motor de combustion interna - Woodward 2301/ EGM Speed Loop test set NP: 8909-555 NS: 11529449
- Administrador de Energía - Woodward EasyGen 3100 NP: 8440-1845 NS: 1608513
- Fuente de Corriente Continua - Woodward Power Supply – BL18-230-24
- Laptop Toshiba Satellite A 305
- Cables para alimentación, circuitos de control y programación.

4.3. Software:

- Woodward Toolkit Standard 3.3
- Woodward Servlink Server 1.59.6
- Woodward Watch Window Standard 1.6.6

4.4. Diagramas:

- Esquemático de Conexiones
Anexo A: USFQ-TIME-JM-11-1-A.dwg

4.5. Principios de operación



Figura 57: 2301 / EGM Speed Loop Test Set

Este equipo es un instrumento electrónico fácil de usar, compacto y versátil. Permite simular varios motores de combustión interna y se usa para calibrar y comisionar tarjetas de regulación de velocidad electrónica.

Ofrece las siguientes características:

- Simulación de actuadores para equipos de controles 2301
- Simula la señal de velocidad sensada por un MPU (Magnetic Pick Up)
- Capacidad de aumentar y disminuir carga.
- Visualiza el voltaje de control del actuador
- Permite configurar la aceleración del motor para simular las diferentes respuestas de motores de combustión interna.
- Función de arranque de la máquina.
- Medidor de frecuencia digital para visualizar la velocidad exacta.

Simulación del Actuador

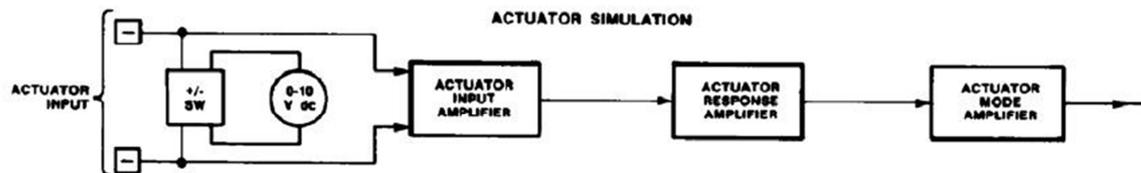


Figura 58: Diagrama de flujos de la simulación del Actuador

El regulador de velocidad electrónico 2301D tiene una salida analógica (salida del actuador) que envía una señal de 0 – 200 mA y refleja la señal de corrección del error o diferencia entre la velocidad de referencia y la velocidad sensada. Esta señal de control ingresa en la entrada del actuador del simulador la cual le indica al equipo si tiene que acelerar o desacelerar. Esta señal es procesada internamente y simula la acción de un motor de combustión interna al aumentar o disminuir el suministro de combustible.

Simulación del Motor

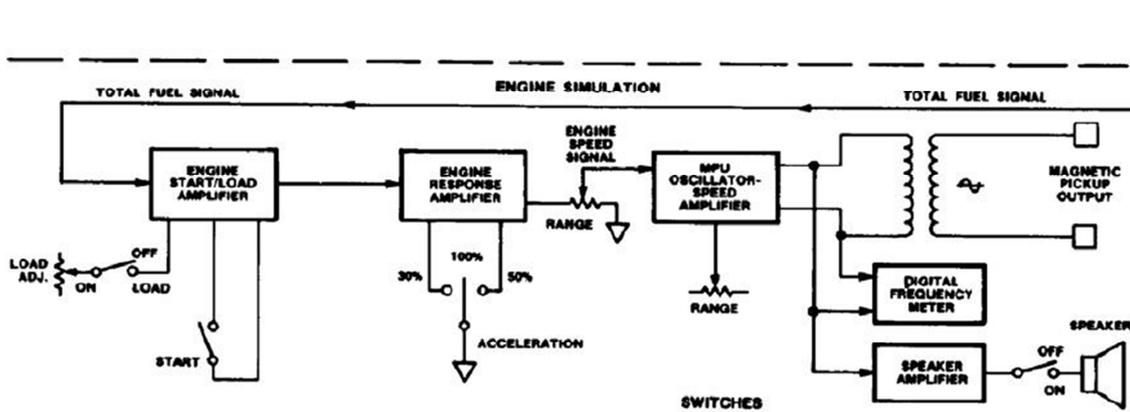


Figura 59: Diagrama de Bloques del sistema de Simulación del Motor

En la Figura 59 se puede observar el diagrama de bloques de la maleta de pruebas y las diferentes opciones que tiene el equipo para realizar diferentes tipos de simulación. En la vida práctica, esta maleta se usa para calibrar los equipos de acuerdo a los parámetros de cada motor, esta calibración es un buen punto de partida para encontrar la estabilidad en los motores reales, es decir, es necesario únicamente finos ajustes para lograr la operación estable del motor.

Para simular el arranque del motor en la maleta, se simula una señal de frecuencia, la cual es sensada por el 2301 D e inmediatamente se envía una señal de control al actuador para acelerar y llegar a la velocidad deseada.

Internamente el circuito de la maleta de pruebas, toma la señal del actuador transformada y realiza la acción de acelerar o desacelerar de acuerdo a la diferencia entre la velocidad deseada y la sensada.

Visualización de la velocidad y estabilidad

Para visualizar esta señal, se utilizara la entrada del MPU del equipo EasyGen 3100, la misma mediante el software Toolkit se visualizara esta señal a través del tiempo.

El software Toolkit permite visualizar la velocidad y consigna de velocidad en una misma gráfica, lo que nos permite realizar un monitoreo y análisis de la estabilidad del equipo y su velocidad de respuesta a los cambios de velocidad de referencia. En la Figura 60 podemos observar en rojo la velocidad real del motor y en verde la velocidad de referencia.

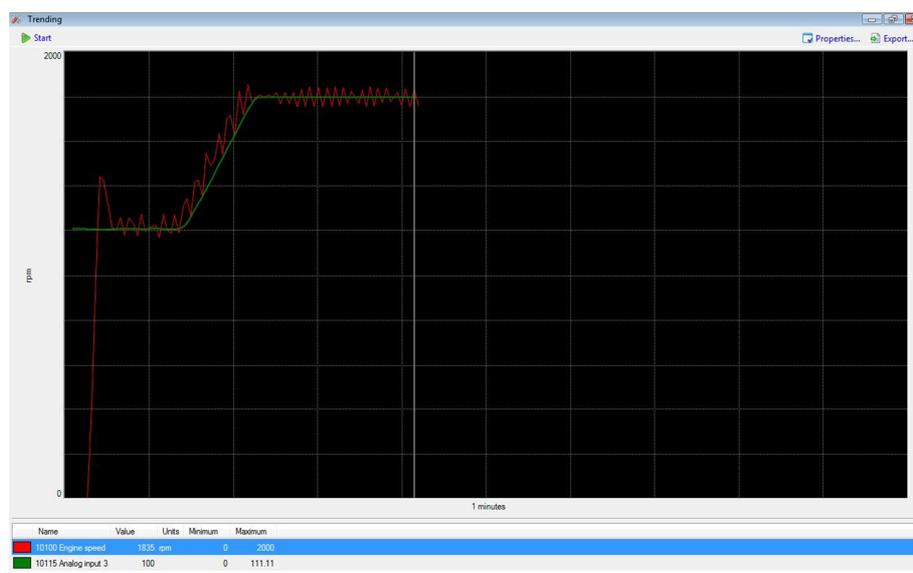


Figura 60: Visualización vía Toolkit

En la Figura 60 se pudo observar como la velocidad del motor se encuentra inestable, ya que está oscilando alrededor de la velocidad de referencia. En este caso es necesario ajustar las constantes Proporcional, Integral y derivativa para lograr un

comportamiento estable, en la Figura 61 se puede observar un comportamiento estable del motor.

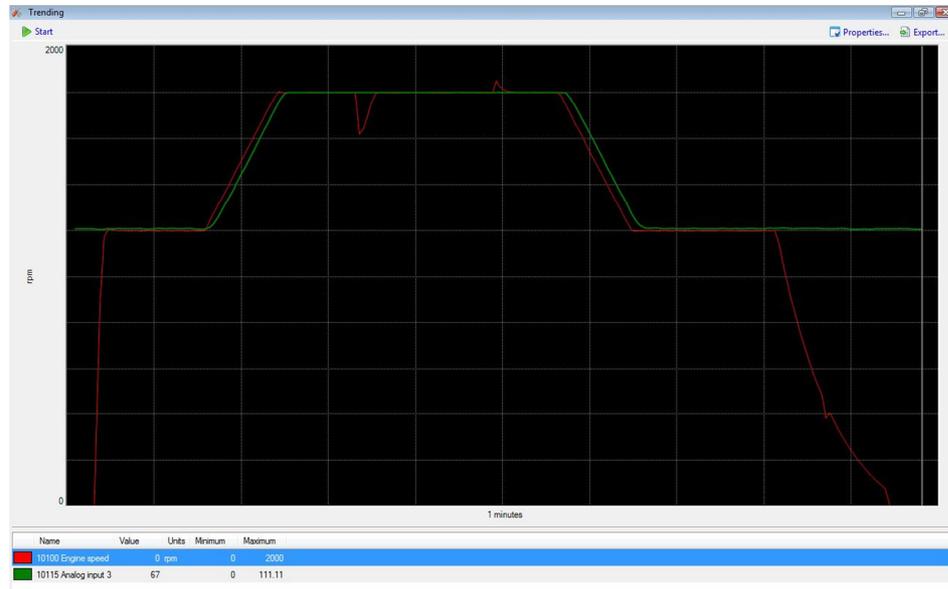


Figura 61: Comportamiento estable

En la Figura 61 se puede observar el arranque del motor hasta su velocidad ralentí (1200 RPM) su rampa de aceleración a velocidad nominal (1800 RPM), luego se puede ver una caída de velocidad correspondiente a un aumento del 100 % de carga al motor y como el motor en un tiempo corto logra recuperar su operación normal a 1800 RPM. Pocos segundos después se retira el 100% de la carga aplicada provocando un pico de sobre velocidad y luego el motor restablece su velocidad en 1800 RPM. En la secuencia de apagado vemos la rampa de desaceleración a 1200 RPM, un corto periodo de enfriamiento y luego su rampa hasta que el motor se apaga.

En los Reguladores de Velocidad Electrónicos se puede programar las rampas de aceleración y desaceleración y la velocidad de respuesta del motor mediante su control PID, en la Figura 62 se puede observar un ejemplo en el cual la velocidad de

respuesta del motor esta programa de tal manera que toma alrededor de 4 minutos para alcanzar su velocidad ralentí (1200 RPM), en la Figura 61 el motor alcanza la velocidad ralentí en alrededor de 3 segundos.

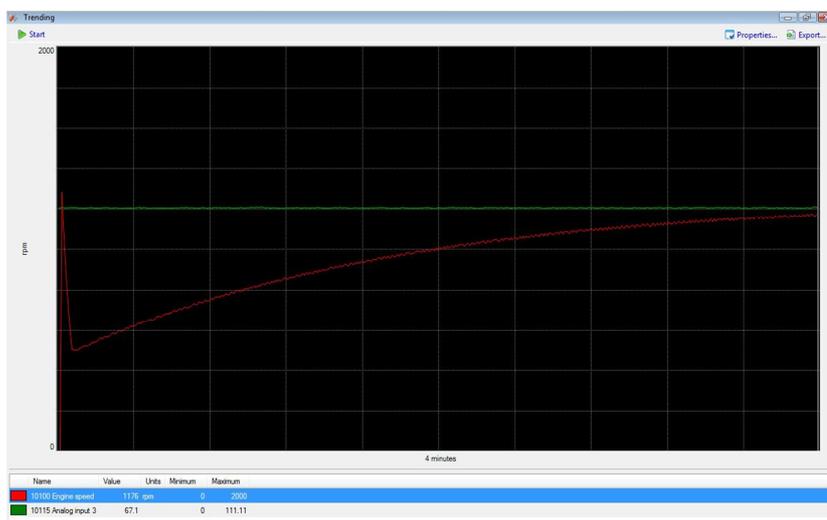


Figura 62: Rampa de aceleración larga

5. Conclusiones y Recomendaciones

- Los reguladores de velocidad electrónicos permiten personalizar la secuencia de arranque del motor.

En los Reguladores de velocidad electrónicos es posible configurar varios set point de velocidad de referencias temporizadas, lo que permite diseñar y controlar la secuencia de arranque del motor.

Ejemplo:

El motor arranca a una velocidad de ralentí (1200 RPM), permanece por 2 minutos (calentamiento del motor) y su set point cambia a velocidad nominal (1800 RPM) en la que opera normalmente.

- Los Reguladores de Velocidad Electrónicos tienen la opción de programar diferentes referencias de Velocidad mediante señales análogas externas.

Si se requiere el control remoto de velocidad mediante un PLC o sistema SCADA, es posible configurar un rango de control de velocidad en función de una señal analógica externa.

Ejemplo:

Velocidad nominal: 1800 RPM

Rango de control deseado 1750 – 1850 RPM

Señal analógica externa: 4 – 20 mA

De acuerdo a los datos la señal de 4 mA equivale a 1750 RPM y 20 mA equivalen a 1850 mA. Internamente en el equipo se realizara una interpolación lineal para encontrar el

equivalente en velocidad de cada nivel de corriente. Esto permite un ajuste fino de velocidad a partir de una fuente de control externa remota (PLC o SCADA).

- En los Reguladores de Velocidad electrónicos se puede configurar rampas de aceleración y des aceleración de acuerdo a la aplicación y a diferentes necesidades de operación.

Cuando existen cambios de set points de regulación de velocidad, es posible programar rampas de aceleración y des aceleración en función del tiempo.

- Los Reguladores de Velocidad electrónicos controlan el limitador de combustible al arranque de manera automática.

El regulador de velocidad electrónico detecta el estado de operación se encuentra el motor (arranque, en rampa a velocidad ralentí, calentamiento, en rampa a velocidad nominal, control de velocidad, parada) esto permite agregar funciones como la limitación de suministro de combustible al arranque.

Cuando el motor está arrancando, necesita únicamente la cantidad de combustible necesaria para lograr una combustión interna satisfactoria, ya que si el suministro es mayor al deseado, vamos a tener un exceso de combustible el cual no será usado en la combustión y saldrá como desperdicio al medio ambiente.

- Los Reguladores de Velocidad electrónicos permiten cambiar el modo de control de velocidad con caída de velocidad (Droop) e Isócrono a través de señales eléctricas discretas.

Mediante entradas discretas se pueden cambiar de modos de operación Isócrono/Caída de Velocidad, sin necesidad de reprogramar el equipo. Esto agrega flexibilidad a la operación.

- Los Reguladores de Velocidad electrónicos permite visualizar y controlar variables del motor a distancia.

Mediante sus salidas analógicas y puertos de comunicación es posible monitorear las variables del equipo de manera remota.

- Los Reguladores de Velocidad electrónicos permite el desarrollo de un HMI personalizado de acuerdo a cada aplicación.

Mediante el puerto de comunicación, se tiene acceso a todas las variables del equipo. Mediante el desarrollo de una aplicación y el uso de un PLC o Computador es posible crear una interfaz de operación y monitoreo acorde a las necesidades de cada usuario.

- Los Reguladores de Velocidad electrónicos permite la integración de un administrador energético.

Sus múltiples entradas analógicas y discretas configurables permiten fácil conexión y comunicación con equipos de administración de unidad múltiples operando en paralelo

como los Administradores Energéticos, muy usados en la industria de la generación eléctrica.

- Los Reguladores de Velocidad electrónicos disminuyen el costo del mantenimiento de los equipos.

Al controlar la velocidad de manera óptima, evitamos que el motor sufra desgaste innecesario en sus componentes, se puede optimizar la mezcla aire – Combustible evitando que se genere acumulación de desechos de combustible en los componentes del motor, ahorrando costos de limpieza del motor.

- Mediante el banco de pruebas se puede estudiar los diferentes efectos de las variables del control en operación y diseñar modos de operación.

Estos equipos permiten realizar simulaciones de operación, las cuales dan la oportunidad de capacitar al personal de operación a un bajo costo.

Permite también realiza estudios para optimizar el sistema de control de velocidad.

- La posibilidad de generar históricos con el HMI permite realizar un mejor análisis de fallas y eventos.

En el desarrollo de la interfaz Hombre Maquina es posible generar un registro de eventos (arranques, paradas de emergencia, inestabilidad, etc.) los cuales permiten al usuario

generar u registro de eventos el cual puede ser usado para realizar un análisis de falla e implementar métodos preventivos de protección y mantenimiento de cada motor.

- La modernización del Regulador de Velocidad Mecánico a Electrónico permite:
 - Automatizar varios procesos de acuerdo a la necesidad de cada aplicación, es decir, dan flexibilidad a la operación de cada motor.
 - Registrar eventos con los cuales se puede realizar análisis de falla.
 - Analizar los parámetros operativos para implementar acciones correctivas, preventivas y predictivas.
 - Mejorar la velocidad de respuesta del motor a los cambios de carga.

6. Bibliografía:

- [1] Woodward Governor Company, Manual 26260: Governing Fundamentals and Power Management.
- [2] Woodward Governor Company, Manual 83402: PID Control
- [3] Woodward Governor Company, Manual 55016: 2301 Speed Loop Test Box with Load Sensor Test.
- [4] Woodward Governor Company, Manual 26247: 2301D and 2301D-EC Digital Load Sharing and Speed Controls for Engines.
- [5] Woodward Governor Company, Manual 25070: Electronic Control Installation Guide.
- [6] Woodward Governor Company, Manual 82510: Magnetic Pickups and Proximity Switches for Electronic Controls.
- [7] Woodward Governor Company, Manual 82389: 2301A Electronic Load Sharing and Speed Control
- [8] Woodward Governor Company, Manual 37415: EasyGen-3000 (Package 2) Genset Control – Configuration.
- [9] Woodward Governor Company, Manual 82560: EG-3P Actuator.
- [10] Woodward Governor Company, Manual 37512: UG-Actuator.
- [11] Woodward Governor Company, Manual 36604: PGA Governor.
- [12] Woodward Governor Company, Manual 03036: UG-5.7, 8, and 10 Lever Governors.
- [13] Woodward Governor Company, Manual 03040: UG-5.7, 8, and 10 Dial.

[14] Woodward Governor Company, Manual 03108: 3161 Governor Air Pressure Fuel Limiter.

[15] Woodward Governor Company, Manual 03101: 3161 Governor.

[16] Woodward Governor Company, Manual 25805: Governor Test Stand.

[17] Woodward Governor Company, Manual 89015: Hydraulic Amplifier (Electrical Input).

[18] Woodward Governor Company, Manual 03202: Watch Window Standard.

[19] Woodward Governor Company, Manual 03366: Toolkit Custom HMI Software from
Woodward.

[20] Woodward Governor Company, Manual 01302: Speed Droop and Power Generation.

[21] Woodward Governor Company, Manual 51005: Retrofitting UG-8 Controlled Engines with
2301A Electronic Governing.

[22] Woodward Governor Company, Application Note 25014: Gas Engine Governing.

[23] "Proporcional integral derivativo." Wikipedia, La enciclopedia libre. 8 dic 2010, 23:10 UTC. 12
ene 2011, 15:43

<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Proporcional_integral_derivativo&oldid=4237853

4>

