



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA
CENTRAL HIDROELÉCTRICA”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:
ALFONSO GARCÍA RIVERA.**

**ASESOR:
DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS**

MORELIA, MICHOACAN, ENERO DEL 2012



Agradecimientos

Primeramente agradezco a dios por darme la vida y por estar conmigo a cada paso de mi vida profesional.

A mi asesor por haber ayudado aclarar las dudas durante la realización de la tesis y por las recomendaciones que en su momento me sugirió por lo que sin su ayuda no se habría concluido la realización de la tesis.

A todos mis amigos que conocí durante la estancia en la facultad de ingeniería eléctrica y a los profesores que me impartieron clases durante mi estancia como estudiante.

Dedicatoria

Esta tesis es dedicada a mi familia, primeramente a mis padres Alfonso García García y María Elena Rivera Martínez que estuvieron apoyándome incondicionalmente para concluir mis estudios. A mis hermanos y hermanas que en su momento estuvieron para brindarme su ayuda.

También a personas cercanas a mí como mi sobrina Juana Monserratasí como de sobrinos además de algunos tíos y tías

Agradecimientos	i
Dedicatoria	ii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Metodología.....	4
1.5 Estructura de tesis.....	4
Capítulo 2 Las centrales hidroeléctricas	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Generación hidroeléctrica en México.....	6
2.3 Generación eléctrica por fuentes convencionales en México.....	7
2.3.1 Termoeléctrica.....	8
2.3.2 Hidroeléctrica.....	8
2.3.3 Nucleoeléctrica.....	8
2.3.4 Geotermoeléctrica.....	9
2.4 Generación Eléctrica por Fuentes Alternas.....	10
2.4.1 Eóloeléctrica.....	10
2.4.2 Energía Solar.....	10
2.4.3 Mareomotrices.....	11
2.5 Tipo de Centrales Hidroeléctricas.....	11
2.5.1 Central Hidroeléctrica de Pasada.....	12
2.5.2 Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva.....	13

2.5.3 Centrales Hidroeléctricas de Bombeo.....	13
2.6 Componentes de una Central Hidroeléctrica.....	14
2.6.1 La Presa.....	15
2.6.2 Los Aliviaderos.....	16
2.6.3 Tomas de agua.....	16
2.6.4 Canal de derivación.....	16
2.6.5 La chimenea de equilibrio.....	17
2.6.6 Tuberías forzadas.....	17
2.6.7 Casa de máquinas.....	17
2.7 Unidades turbogeneradoras.....	18
2.7.1 Tipos de turbinas hidráulicas.....	19
2.7.2 Turbina Peltón.....	21
2.7.3 Turbina Francis.....	24
2.7.4 Turbina Kaplan.....	26
2.8 Generador Síncrono.....	28
Capítulo 3 Modelo de una central hidroeléctrica	30
3.1 Introducción.....	30
3.2 Obtención del modelo de la central hidroeléctrica.....	31
3.3 Elementos básicos en el modelado del sistema hidráulico.....	32
3.3.1 Resistencia hidráulica.....	32
3.3.2 Capacitancia hidráulica.....	33
3.4 Modelo hidráulico.....	34
3.4.1 Obtención del modelo hidráulico en espacio de estado.....	34

3.5 Elementos básicos en el modelado del sistema mecánico.....	36
3.5.1 Resistencia mecánica.....	36
3.5.2 Capacitancia mecánica.....	37
3.6 Generador síncrono.....	38
3.6.1 Descripción física de la maquina síncrona.....	39
3.6.2 Eje de Cuadratura q y eje de directa d.....	40
3.6.3 Representación esquemática de la maquina síncrona.....	40
3.7 Transformación de Park.....	41
3.7.1 Ecuaciones de Enlace de flujo.....	43
3.7.2 Ecuación de voltaje.....	45
3.8 Formulación de Ecuaciones de Espacio de Estado.....	45
3.8.1 Formulación de corriente.....	46
3.8.2 Ecuación de onda normalizada.....	46
Capítulo 4 Simulación de una Central Hidroeléctrica	49
4.1 Introducción.....	49
4.2 Descripción Dinámica de los Diagramas de Bloques en 20-Sim.....	50
4.2.1 Señal de entrada senoidal.....	50
4.2.2 La ganancia.....	51
4.2.3 Sumador.....	52
4.2.4 Gráficador.....	52
4.2.5 Bloque dinámico.....	53
4.3 Diagrama del Sistema Hidráulico.....	53
4.4 Simulación de un generador síncrono.....	58

4.5 Sistema Mecánico acoplado al generador síncrono.....	67
4.6 Simulación de la Central Hidroeléctrica en secuencia a, b, c.....	70
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones	75
5.1 Conclusiones.....	75
5.2 Recomendaciones.....	76
Bibliografía.....	77

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día la generación eléctrica es un tema que se conoce en la mayor parte del mundo, la forma más común de generación es mediante las centrales eléctricas de las cuales existen de diferentes tipos. Una central eléctrica es esencialmente, una instalación que emplea una fuente de energía primaria para hacer girar los álabes de una turbina que a su vez hace girar una gran bobina en el interior de un campo magnético, generando así electricidad. Cuando se habla de una central se engloban una gran cantidad de ellas para lo cual estableceremos una en particular.

Como ejemplo de una central está la central hidroeléctrica cuya función es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica. Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina una cierta energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el alternador y produce la corriente eléctrica.

Las centrales eléctricas se componen de elementos constructivos que forman una estructura bien definida en los diferentes tipos de centrales como son; centrales de regulación, centrales de agua fluyente y centrales de bombeo.

1.1 Antecedentes

A lo largo de la historia de la humanidad, hemos aprovechado la energía del agua de distintas maneras, y sólo es a partir de la revolución industrial cuando comenzamos a utilizar a gran escala la enorme cantidad de energía contenida en el agua.

La energía hidráulica fue el principal motor de la industrialización de nuestro país en el siglo XIX. Ingenios azucareros y fábricas de hilados y tejidos con ruedas hidráulicas se multiplicaron en muchas regiones del país. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX.

En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad. Sin embargo, fue hasta el 14 de agosto de 1937 cuando CFE comenzó formalmente sus operaciones en la constitución formal de la comisión federal de electricidad para dar paso a los primeros proyectos para el desarrollo de la industria. Un modelo económico que sirvió como plataforma para el desarrollo futuro de las grandes plantas hidroeléctricas que se construirían en el país fue la de Ixtapantongo que se inició en 1937 cuando un pequeño grupo de ingenieros de la comisión federal de electricidad comenzó los estudios para la posible construcción de la planta eléctrica que más tarde se llamaría sistema hidroeléctrico.

La tecnología de las principales instalaciones se ha mantenido igual durante el siglo XX. Las centrales dependen de un gran embalse de agua contenido por una presa. El caudal de agua se controla y se puede mantener casi constante. El agua se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas y

turbinas para adecuar el flujo de agua con respecto a la demanda de electricidad. El agua que entra en la turbina sale por los canales de descarga. Los generadores están situados justo encima de las turbinas y conectados con árboles verticales. El diseño de las turbinas depende del caudal de agua; las turbinas Francis se utilizan para caudales grandes y saltos medios y bajos, las turbinas Peltón para grandes saltos y pequeños caudales.

La generación hidroeléctrica de acuerdo con datos proporcionados por la CFE ocupa un 22.16% de la generación eléctrica en México la información presentada es del 2000 al 2011.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis es el modelado y simulación de una central hidroeléctrica a partir de sus ecuaciones de estado y así establecer el comportamiento de las variables analizadas las cuales son caudal, par mecánico y las salidas de corriente del generador en secuencia a, b, c.

1.3 Justificación

Actualmente, se han desarrollado y aplicado nuevas formas de generar energía eléctrica sin contaminar, una de las formas de generar es mediante las centrales hidroeléctricas. La generación hidroeléctrica es la más eficiente forma de aprovechamiento energético, ya que es un recurso que tiene muy bajo índice de contaminación ambiental. Además, que es una de las formas de generación más rentables para su producción. Teniendo en cuenta que en nuestro país hay bastantes recursos naturales, es posible la implementación de nuevas centrales hidroeléctricas que permitan en desahogar a las centrales termoeléctricas y cubrir los picos en las horas de demanda entrando en operación más rápido. Para llevar a cabo esta secuencia de funcionamiento estableceremos el análisis y simulación de la central eléctrica. De esta manera se observará la energía eléctrica que se puede generar tomando en cuenta el aprovechamiento energético con el que se cuenta.

El análisis de la central hidroeléctrica se realizará en variables de estado utilizando el simulador 20-Sim el cual es un software que permite utilizar diagramas de bloques para representar el modelo físico donde intervienen un gran número de variables que interactúan entre sí.

1.4 Metodología.

La metodología que se utiliza en este trabajo de tesis es la de investigar y estudiar las partes principales de una central hidroeléctrica en nuestro país y documentar la información prestada en este desarrollo.

Después de la comprensión de los conceptos se procedió a realizar el análisis matemático para determinar las ecuaciones de estado de la central hidroeléctrica. Después se observó el comportamiento de la central. Se hizo uso de un software de simulación, con este simulador observamos el comportamiento de las variables que nos interesa de la central hidroeléctrica.

1.5 Estructura de la tesis.

Esta tesis está conformada por 5 capítulos, que se desarrollaron de la siguiente manera.

Capítulo 1. En este capítulo se da una introducción y describe la importancia de la metodología del objetivo del trabajo como una pequeña definición de central hidroeléctrica.

Capítulo 2. En este capítulo se describen los antecedentes de centrales hidroeléctricas y sus conceptos básicos además de los elementos principales que lo conforman.

Capítulo 3. Aquí se desarrolló de manera analítica y matemática el modelo de una central hidroeléctrica y se obtuvieron las ecuaciones de estado

Capítulo 4. En este capítulo se presenta la simulación de la central hidroeléctrica que muestra el comportamiento de las variables deseadas obtenida en el capítulo 3.

Capítulo 5. Por último en este capítulo se dan las conclusiones sobre lo desarrollado y las futuras recomendaciones.

Capítulo 2

Las Centrales Hidroeléctricas

2.1 Introducción

Actualmente, la energía eléctrica en el mundo se puede producir a través de distintos medios. Uno de ellos es a través de centrales hidroeléctricas en las que se obtiene la energía a partir de la energía potencial del agua ya que existen algunas centrales que se basan en la caída natural del agua, cuando el caudal es uniforme. Estas instalaciones se llaman “Centrales de Pasada”. En otros casos el hombre tiene la necesidad de construir presas para almacenar agua en lugares altos para poder liberar el agua de esta manera generar electricidad. Las plantas hidroeléctricas aprovechan ya sea la energía potencial del agua o la cinética para mover turbinas y generadores que producen electricidad. El agua que fluye y cae a través de las "cortinas" de las presas, se utiliza para hacer girar las aspas de las turbinas. Hoy en día en México existen varias plantas hidroeléctricas, ya que son especialmente importantes en la producción de generación de energía eléctrica.

Para el funcionamiento adecuado, las centrales hidroeléctricas están constituidas por un determinado número de componentes. Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas) o generatrices (bombas) modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. La turbina desarrolla un movimiento giratorio que acciona el alternador y produce la corriente eléctrica.

2.2 Generación hidroeléctrica en México

La generación de energía eléctrica en México la realiza la Comisión Federal de Electricidad (CFE); esto a través de centrales Hidroeléctricas, Termoeléctricas y Nucleoeléctricas por el lado de las fuentes convencionales y Eólicas por parte de las fuentes alternas dentro de las cuales se incluyen también la solar y mareomotriz para lo cual mencionaremos la forma de generar energía eléctrica y del funcionamiento de algunas de las centrales mencionadas anteriormente para después establecer de manera más detallada la estructura y funcionamiento de las partes principales de una central hidroeléctrica.

En nuestro país conociendo la importancia que tiene hoy en día la generación hidroeléctrica dando a conocer el porcentaje de generación hidroeléctrica de acuerdo con datos proporcionados por la CFE ocupa un 22.16% de la generación eléctrica en México.

Para poder saber más acerca de la generación hidroeléctrica en nuestro país hoy en día debemos conocer cuántas centrales hay en operación y la capacidad que estas generan para esto tenemos que hay 64 Centrales Hidroeléctricas, de las cuales 20 son de gran importancia y 44 son centrales pequeñas. Suman un total de 181 unidades generadoras de este tipo. Las 20 centrales más grandes se ubican de la siguiente manera: 5 en la Gerencia Regional de Producción Noroeste, 2 en la Gerencia Regional de Producción Norte, 5 en la Gerencia Regional de Producción

Occidente, 2 en la Gerencia Regional de Producción Central y 6 en la Gerencia Regional de Producción Sureste. Para las cuales mencionaremos algunas de ellas **Aguamilpa** Ubicación: Nayarit Capacidad: 3 x 320 MW, **Aguaprieta** Ubicación: Jalisco Capacidad 2 x 120 MW, **Angostura** Ubicación: Chiapas Capacidad: 5 x 180 MW, **Bacurato** Ubicación: Sinaloa Capacidad 2 x 46 MW, **Chicoasen** Ubicación: Chiapas Capacidad: 5 x 300 + 3 x 310 MW, **Comedero** Ubicación: Sinaloa Capacidad: 2 x 50 MW, **El Cajón** Ubicación: Nayarit Capacidad: 2 x 375 MW, **El Caracol** Ubicación: Guerrero Capacidad: 3 x 198 MW.

En la figura 2.1 se presentan los porcentajes de capacidad efectiva instalada por tipo de generación.



Figura 2.1 Distribución de generación en México.

2.3 Generación eléctrica por fuentes convencionales en México

Primeramente, mencionaremos las formas más importantes de generar energía eléctrica en México las cuales son de fuentes convencionales como las termoeléctricas, geotermoeléctricas, nucleoeléctricas e hidroeléctricas describiendo las más importantes cuyos principios de generación se mencionan a continuación.

2.3.1 Termoeléctrica

El principio de funcionamiento de una central termoeléctrica se basa en la conversión de energía calorífica en energía mecánica y luego en energía eléctrica. El funcionamiento de las centrales Termoeléctrica es mediante el combustible se almacena en depósitos adyacentes, desde donde se suministra a la central pasando a la caldera en la que se realiza la combustión. Esta se emplea para calentar el agua que se encuentran en la caldera y producir el vapor este con alta presión hace girar los álabes de la turbina cuyo eje rotor gira conjuntamente con el rotor de un generador que produce la energía eléctrica.

2.3.2 Hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es aquella que utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Son el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para mover una rueda. En general estas centrales aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto geodésico. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica la cual trasmite la energía a un generador el cual la convierte en energía eléctrica

2.3.3 Nucleoeléctrica

El principio para la generación de energía eléctrica es la fisión nuclear. En este tipo de reacción, un núcleo pesado se rompe generalmente en dos fragmentos cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, lo que va acompañado de una emisión

de neutrones y radiación gamma con la liberación de una gran cantidad de energía. En el reactor de agua en ebullición que emplea agua ligera como moderador y refrigerante el cuál al trabajar a menor presión alcanza la temperatura de ebullición al pasar por el núcleo del reactor y parte del líquido se transforma en vapor producido en los generadores se conduce al condensador, a través de la turbina que transforma la energía térmica en energía mecánica la rotación de los álabes de la turbina acciona directamente el alternador de la central y produce energía eléctrica.

2.3.4 Geotermoeléctrica

Para poder tener las condiciones necesarias para extraer yacimientos de vapor los lugares deben tener condiciones especiales como son capas rocosas porosas y capas rocosas impermeables que atrapan agua y vapor de agua a altas temperaturas y presión y que impiden que éstos salgan a la superficie. Si se combinan estas condiciones se produce un yacimiento geotérmico. Las plantas geotérmicas aprovechan este calor generado por la tierra. Una vez que se dispone de pozos de explotación se extrae el fluido geotérmico que consiste en una combinación de vapor, agua y otros materiales. Este se conduce hacia la planta geotérmica donde debe ser tratado. Primero pasa por un separador de donde sale el vapor y la salmuera y líquidos de condensación y arrastre, que es una combinación de agua y materiales. Esta última se envía a pozos de reinyección para que no se agote el yacimiento geotérmico. El vapor continúa hacia las turbinas que con su rotación mueve un generador que produce energía eléctrica.

2.4 Generación Eléctrica por Fuentes Alternas

2.4.1 Eóloelétrica

La energía eólica es aquella que consiste en producir energía eléctrica a partir de la transformación de la energía del viento (energía cinética) en energía mecánica y después transformándola en energía eléctrica a través de un generador eléctrico. El cuál se da por medio de las aspas que son impulsadas por el viento y convierten la energía cinética en energía mecánica; un sistema de orientación del conjunto de aspas, para maximizar el aprovechamiento del viento, el cuál calcula la dirección del mismo y envía la información a una unidad de control para modificar la inclinación de las paletas. Un sistema de control y protección que controla la generación y prevé un sistema de protección en general; un sistema mecánico multiplicador de la velocidad de rotación un generador eléctrico para transformar la energía mecánica a energía eléctrica.

2.4.2 Energía Solar

Aunque en México esta generación no se lleva a cabo de manera muy significativa en comparación con la eólica, se presenta una pequeña reseña de esta. Actualmente, la energía solar está siendo aprovechada para fines energéticos a través de dos vías:

La térmica dispone de una gran superficie, para recolectar la radiación solar, por medio de discos o cilindros colectores. Estos concentran la radiación sobre un punto o línea por la que pasa una tubería en la que circula un fluido (aceite). Estas instalaciones trabajan a media temperatura en donde por medio de calor de la radiación solar se calienta un fluido y produce vapor que se dirige hacia una turbina que producirá la energía eléctrica.

La fotovoltaica esta permite la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante las llamadas celdas solares. Estas hacen posible la producción de energía eléctrica a partir de la radiación solar a causa al efecto fotovoltaico, un efecto por el que se transforma directamente la energía luminosa en energía eléctrica y que se produce cuando la radiación solar entra en contacto con un material semiconductor cristalino.

2.4.3 Mareomotrices

La energía mareomotriz es la que se obtiene aprovechando las mareas, es decir la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la tierra y la luna, que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del sol sobre las masas de agua de los mares. Esta diferencia de altura puede aprovecharse poniendo partes móviles al proceso natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable. La energía mareomotriz tiene la cualidad de ser renovable, en tanto que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, ya que en la transformación energético no se producen subproductos contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos.

2.5 Tipo de Centrales Hidroeléctricas

Para poder determinar los tipos de centrales y saber sus características principales debemos tener en cuenta algunos conceptos básicos como son:

- a. **Nivel:** horizontalidad constante de la superficie de un terreno, o de la superficie libre de los líquidos.

- b. **Cota:** valor de la altura a la que se encuentra una superficie respecto del nivel del mar.
- c. **Caudal:** cantidad de líquido, expresada en metros cúbicos o en litros, que circula a través de cada una de las secciones de una conducción, abierta o cerrada en la unidad de tiempo.
- d. **Salto de agua:** paso brusco o caída de masas de agua desde un nivel a otro inferior. Numéricamente se identifica por la diferencia de cota que se da en metros.
- e. **Embalse:** resulta de almacenar todas las aguas que afluyen del territorio sobre el que está enclavado. Las dimensiones del embalse dependen de los caudales aportados por el río. Su capacidad útil es toda aquella agua embalsada por encima de la toma de la central. La capacidad total incluye el agua no utilizable.

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica esto es lo importante de una central hidroeléctrica para lo cual es necesario establecer y describir los tipos de centrales los cuales mencionaremos a continuación.

2.5.1 Central Hidroeléctrica de Pasada

Una central de pasada es aquella en que no existe una acumulación apreciable de agua "corriente arriba" de las turbinas.

En una central de este tipo las turbinas deben aceptar el caudal disponible del río "como viene", con sus variaciones de estación en estación, o si ello es imposible el agua sobrante se pierde por rebosamiento. En ocasiones un embalse relativamente pequeño bastará para impedir esa pérdida por rebosamiento. En la misma se aprovecha un estrechamiento del río y la obra del edificio de la central (casa de máquinas) puede formar parte de la misma presa. El desnivel entre "aguas arriba" y "aguas abajo", es reducido y si bien se forma un remanso de agua a causa de la

presa, no es demasiado grande. Este tipo de central, requiere un caudal suficientemente constante para asegurar a lo largo del año una potencia determinada.

2.5.2 Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva

En este tipo de proyecto se embalsa un volumen considerable de líquido "aguas arriba" de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales. El embalse permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Del volumen embalsado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas. Con el embalse de reserva puede producirse energía eléctrica durante todo el año aunque el río se seque por completo durante algunos meses, cosa que sería imposible en un proyecto de pasada. Las centrales con almacenamiento de reserva exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de pasada, pero en la mayoría de los casos permiten usar toda la energía posible y producir Kw-Hr más baratos.

2.5.3 Centrales Hidroeléctricas de Bombeo

Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que posibilitan un empleo más racional de los recursos hidráulicos de un país. Disponen de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel durante el día, las centrales de bombeo funcionan como una central convencional generando energía. Al caer el agua, almacenada en el embalse superior, hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador. Después el agua queda almacenada en el embalse inferior. Durante las horas del día en la que la demanda de energía es menor el agua es bombeada al embalse superior para que pueda iniciar el ciclo productivo nuevamente. Para ello la central dispone de grupos de motores-bomba o alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores.

En la figura 2.2 se muestra la representación de los componentes de una central de bombeo que es una central hidroeléctrica.

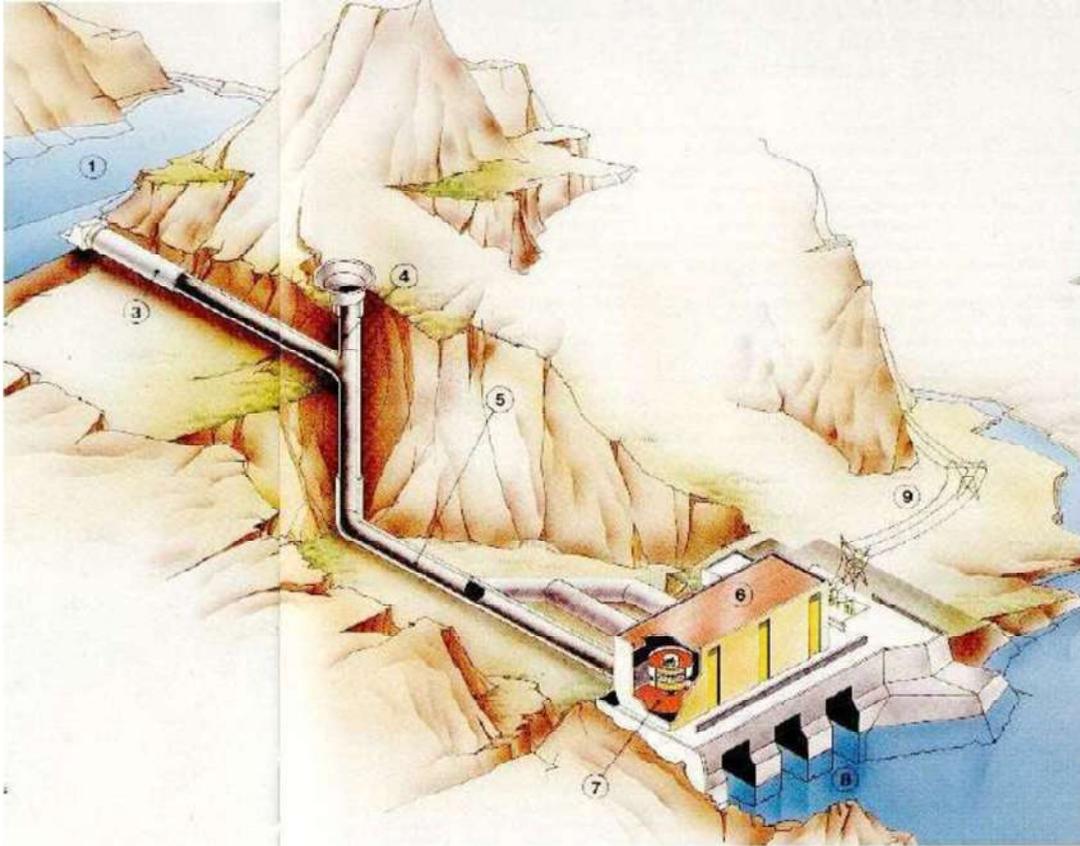


Figura 2.2 Una central hidroeléctrica de bombeo. 1) Embalse superior 2) Presa 3) Galería de conducción 4) Tubería forzada 5) Central 6) Turbinas y generadores 7) Desagües 8) Líneas de transporte de energía eléctrica 9) Embalse inferior o río.

2.6 Componentes de una Central Hidroeléctrica

Conociendo las diferentes centrales hidroeléctricas se hará mención de los principales componentes que conforman la central los cuales son: la presa o represa, los aliviaderos, las tomas de agua, canales de derivación, la chimenea de equilibrio, las tuberías forzadas, la casa de máquinas, las turbinas hidráulicas y los generadores.

2.6.1 La Presa

El primer elemento y uno de los más importantes que encontramos en una central hidroeléctrica es la presa o azud. Se encarga de atajar el río y remansar las aguas. Con estas construcciones se logra un determinado nivel del agua antes de la contención y otro nivel diferente después de la misma. Ese desnivel se aprovecha para producir energía.

Las presas pueden clasificarse por el material empleado en su construcción en el cual hay cuatro tipos diferentes de presas, y son los siguientes:

- a) De gravedad, que retienen el agua gracias al tipo de materiales empleados, como mampostería u hormigones.
- b) De contrafuerte, formadas por una pared impermeable situada aguas arriba y contrafuertes resistentes para su estabilidad, situados aguas abajo.
- c) De arco-bóveda, que aprovechan el efecto transmisor del arco para transferir los empujes del agua al terreno.
- d) De tierra o escollera, con un núcleo de material arcilloso, que a veces es tratado químicamente o con inyecciones de cemento.

En la figura 2.3 se muestra la representación de una presa de una hidroeléctrica.



Figura 2.3 Presa de una Hidroeléctrica.

2.6.2 Los Aliviaderos

Los aliviaderos son elementos vitales de la presa que tienen como misión liberar parte del agua detenida sin que esta pase por la sala de máquinas. Se encuentran en la pared principal de la presa y pueden ser de fondo o de superficie. La misión de los aliviaderos es la de liberar, si es preciso, grandes cantidades de agua o atender necesidades de riego. Para evitar que el agua pueda producir desperfectos al caer desde gran altura, los aliviaderos se diseñan para que la mayoría del líquido se pierda en una cuenca que se encuentra a pie de presa, llamada de amortiguación. Para conseguir que el agua salga por los aliviaderos existen grandes compuertas, de acero que se pueden abrir o cerrar a voluntad, según la demanda de la situación.

2.6.3 Tomas de agua

Las tomas de agua son construcciones adecuadas que permiten recoger el líquido para llevarlo hasta las máquinas por medios de canales o tuberías.

Las tomas de agua de las que parten varios conductos hacia las tuberías, se hallan en la pared anterior de la presa que entra en contacto con el agua embalsada. Esta toma además de unas compuertas para regular la cantidad de agua que llega a las turbinas, poseen unas rejillas metálicas que impiden que elementos extraños como troncos, ramas, etc. Puedan llegar a los álabes y producir desperfectos.

2.6.4 Canal de derivación

El canal de derivación se utiliza para conducir agua desde la presa hasta las turbinas de la central. Generalmente es necesario hacer la entrada a las turbinas con conducción forzada siendo por ello preciso que exista una cámara de presión donde termina el canal y comienza la turbina. Es bastante normal evitar el canal y aplicar directamente las tuberías forzadas a las tomas de agua de las presas.

Debido a las variaciones de carga del alternador o a condiciones imprevistas se utilizan las chimeneas de equilibrio que evitan las sobrepresiones en las tuberías forzadas y álabes de las turbinas a estas sobrepresiones se les denomina "golpe de ariete". Cuando la carga de trabajo de la turbina disminuye bruscamente se produce una sobrepresión positiva, ya que el regulador automático de la turbina cierra la admisión de agua.

2.6.5 La chimenea de equilibrio

La chimenea de equilibrio consiste en un pozo vertical situado lo más cerca posible de las turbinas. Cuando existe una sobre presión de agua esta encuentra menos resistencia para penetrar al pozo que a la cámara de presión de las turbinas haciendo que suba el nivel de la chimenea de equilibrio. En el caso de depresión ocurrirá lo contrario y el nivel bajará. Con esto se consigue evitar el golpe de ariete. Actúa de este modo la chimenea de equilibrio como un muelle hidráulico o un condensador eléctrico, es decir, absorbiendo y devolviendo energía.

2.6.6 Tuberías forzadas

Las estructuras forzadas o de presión, suelen ser de acero con refuerzos regulares a lo largo de su longitud o de cemento armado, reforzado con espiras de hierro que deben estar ancladas al terreno mediante solera adecuada.

2.6.7 Casa de máquinas

Es la construcción en donde se ubican las máquinas (turbinas, alternadores, etc.) y los elementos de regulación y comando.

En la figura 2.4 tenemos el corte esquemático de una central de caudal elevado y baja caída. La presa comprende en su misma estructura a la casa de máquinas. Se

observa en la figura 2.4 que la disposición es compacta, y que la entrada de agua a la turbina se hace por medio de una cámara construida en la misma presa. Las compuertas de entrada y salida se emplean para poder dejar sin agua la zona de las máquinas en caso de reparación o desmontajes.

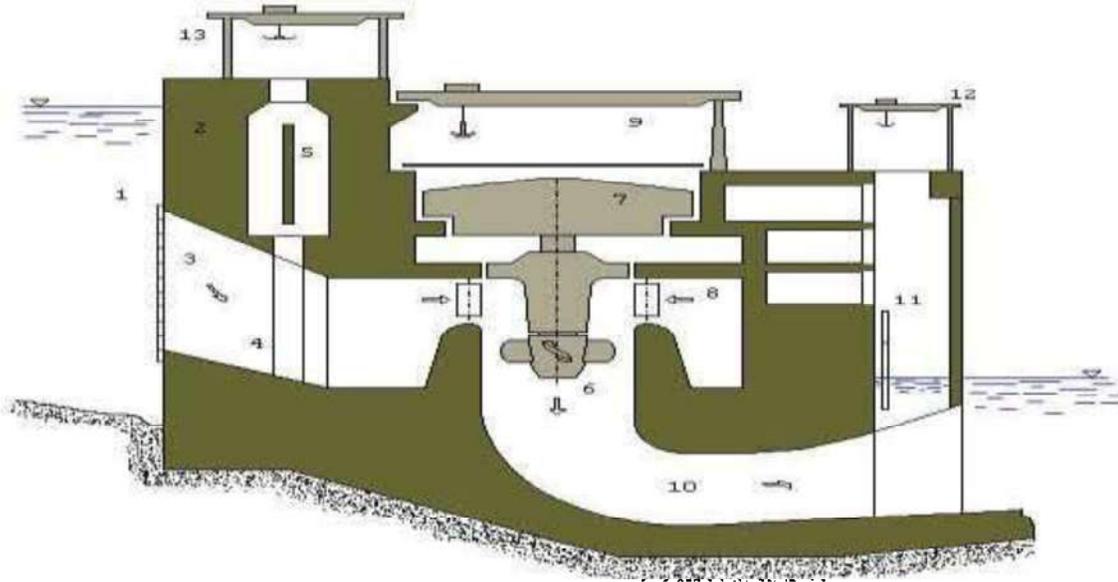


Figura 2.4 Componentes de una Central Hidroeléctrica

1. Embalse 2. Presa de contención 3. Entrada de agua a las máquinas (toma), con reja 4. Conducto de entrada del agua 5. Compuertas planas de Entrada, en posición "izadas". 6. Turbina hidráulica 7. Alternador 8. Directrices para regulación de la entrada de agua a turbina 9. Puente de grúa de la sala de máquinas. 10. Salida de agua (tubo de aspiración) 11. Compuertas planas de salida, en posición "izadas" 12. Puente grúa para maniobrar compuertas salidas. 13. Puente grúa para maniobrar compuertas de entrada.

2.7 Unidades Turbogeneradoras

Cada una está constituida por un acoplamiento entre una turbina y un generador, en el estudio de las turbomáquinas hidráulicas no se tienen en cuenta efectos de tipo térmico, aunque a veces habrá necesidad de recurrir a determinados conceptos

termodinámicos; todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanente, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal constantes. En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; este mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua.

Una turbomáquina elemental o monocelular tiene, básicamente, una serie de álabes fijos, (distribuidor), y otra de álabes móviles, (rueda, rodete, rotor). La asociación de un órgano fijo y una rueda móvil constituye una célula; una turbomáquina mono celular se compone de tres órganos diferentes que el fluido va atravesando sucesivamente, el distribuidor, el rodete y el difusor. El distribuidor y el difusor (tubo de aspiración), forman parte del estator de la máquina, es decir, son órganos fijos; así como el rodete está siempre presente, el distribuidor y el difusor pueden ser en determinadas turbinas, inexistentes.

2.7.1 Tipos de Turbinas Hidráulicas

Las turbinas hidráulicas usadas en las centrales eléctricas se clasifican como: turbinas de reacción y turbinas de acción.

a) Turbinas de reacción: en este tipo de turbinas se emplea el conocido principio de reacción de tal forma que el rodete se mueve siempre sumergido en el agua. El agua se mueve en el sentido radial centrífugo, es decir, que el rodete que actúa como director se encuentra dentro de la rueda móvil. De esta manera podemos definir a una turbina de reacción de la siguiente manera “Es aquella en la que el trabajo mecánico se obtiene por transformación de la energía cinética y presión del agua que fluye a través de las partes giratorias.

b) Turbinas de acción: son aquellas que transforman la energía cinética del agua.

En la presente sección, se inicia el estudio de los tres tipos de turbinas hidráulicas utilizados con mejores resultados en la actualidad. De cada uno de dichos tipos, mencionaremos las características técnicas y de aplicación más destacadas que los identifican, la descripción de los distintos elementos que componen cada turbina, así como el principio de funcionamiento de las mismas.

Se han diseñado turbinas que actúan como bombas cuando funcionan a la inversa, invirtiendo el generador eléctrico para que funcione como un motor. Dado que no es posible almacenar la energía eléctrica de forma económica, este tipo de bombas turbinas se utilizan para bombear agua hacia los embalses, aprovechando la energía cinética generada. El agua embalsada se emplea de nuevo para generar energía eléctrica durante las horas de consumo elevado.

Para lo cual describiremos los tres tipos de turbinas más comunes las cuales son:

- Turbinas de acción - Peltón
- Turbinas de reacción - Francis y Kaplan

Para establecer esta relación en el orden indicado, nos basamos en el empleo de las turbinas en función de la altura del salto, si bien no hay límites definidos en la utilización de unas respecto de los demás. La tendencia en las turbinas hidráulicas modernas es utilizar caídas mayores y maquinas más grandes. Según el tamaño de la unidad, las turbinas Kaplan se emplean en caídas de unos 60 m, y en el caso de las turbinas Francis de hasta 610 m. con el desarrollo de turbinas de hélice normalizadas con ejes casi horizontales, las instalaciones pequeñas han recuperado su atractivo original.

2.7.2 Turbina Peltón

Las turbinas de impulso o de acción tienen la peculiaridad de aprovechar solamente la energía cinética del fluido, no existe gradiente de presión entre la entrada y la salida de la máquina, el grado de reacción es cero.

En la turbina Peltón actúa la energía cinética del agua en forma de chorro libre, que se genera en una tobera colocada al fin de una tubería de presión. La tobera está provista de una aguja de cierre para regular el gasto, constituyendo el conjunto, el órgano de alimentación y regulación de la turbina.

El álabe tiene la forma de doble cuchara, con una arista diametral sobre la que incide el agua, produciéndose una desviación simétrica en dirección axial, buscando un equilibrio dinámico de la máquina en esa dirección. Por ser el ataque del agua en sentido tangencial a la rueda se le denomina también turbina “tangencial”, por tener el fluido un recorrido axial a su paso por el álabe, se clasifica también entre las máquinas de tipo axial.

La aplicación de la turbina Peltón es en aquellos aprovechamientos hidráulicos, donde la ponderación de la carga es importante respecto al caudal. La velocidad específica es baja entre los 10 y 60 m/seg en el sistema métrico y entre 2 y 12 ft/seg en el sistema inglés la clasificación más general que puede hacerse de las turbinas Peltón es en tipo eje horizontal y tipo de eje vertical.

En la posición del eje horizontal el número de chorros por rueda se reduce generalmente a uno o dos, por resultar complicada la instalación en un plano vertical de las tuberías de alimentación y las agujas de inyección. La rueda queda más accesible para su inspección, lo mismo que los inyectores con lo que la reparación de averías pequeñas y desgastes por erosión pueden efectuarse sin desmontar la turbina. Esta aplicación es para donde se tiene aguas sucias que producen deterioros o notable acción abrasiva al generador.

El eje vertical se facilita la colocación del sistema de alimentación en un plano

horizontal lo que permite aumentar el número de chorros por rueda (4 a 6) se puede así incrementar el caudal y tener mayor potencia por unidad. Se acorta la longitud del eje turbina-generador; se disminuye reduce las excavaciones; se puede disminuir el diámetro de la rueda y aumentar la velocidad de giro se reduce en fin el peso de la turbina de potencia.

Con el montaje del eje vertical, la inspección y las reparaciones se hace más difícil por lo que conviene reservar esta disposición para aquellos casos en que se tengan aguas limpias que no produzcan gran efecto abrosivo sobre los alabes e inyectores. En la figura 2.5 se muestra los componentes de una turbina Peltón.



Figura 2.5 Componentes de una turbina Peltón

Los elementos de una turbina Pelton son:

a. Distribuidor

Inyector o varios inyectores que pueden llegar a ser hasta seis. El inyector consta de una tobera de sección circular provista de una aguja de regulación que se mueve axialmente, variando la sección de flujo. Si se requiere una operación rápida para dejar al rodete sin acción del chorro, se adiciona una placa deflectora, así la aguja se cierra en un tiempo más largo, reduciendo los efectos del golpe de ariete. En las turbinas pequeñas se puede prescindir de la aguja y operar con una o más toberas, con caudal constante.

b. Rodete

Es de admisión parcial, depende del número de chorros o de inyectores. Está compuesto por un disco provisto de cucharas montadas en su periferia. Las cucharas pueden estar empernadas al disco, soldadas o fundidas convirtiéndose en una sola pieza con el disco. Esta turbina puede instalarse con el eje horizontal con 1 o 2 inyectores, y con el eje vertical con 3 a 6 inyectores.

c. Rueda motriz.

Está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados. Su periferia está mecanizada apropiadamente para ser soporte de los denominados **cangilones**.

d. Cangilones.

También llamados alabes, cucharas o palas. Son piezas de bronce o de acero especial para evitar, dentro de lo posible, las corrosiones y cavitaciones, concepto este último que será tratado convenientemente. Están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble cuchara, con una arista interior lo más afilada posible y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje, de modo que divide al cangilón en dos partes simétricas y gran concavidad cada una, siendo sobre dicha arista donde incide el chorro de agua.

e. Carcasa de una turbina Peltón

Es la envoltura metálica que cubre los inyectores, rodete y otros elementos mecánicos, su misión consiste en evitar que el agua salpique al exterior cuando, después de incidir sobre los cangilones, abandona a

estos. Dispone de un equipo de sellado, en las zonas de salida del eje, a fin de eliminar fugas de agua. Puede estar formado por un laberinto metálico dotado de drenajes, o bien por juntas de estanqueidad, prensaestopas, etc.

Cuando se trata de turbinas Pelton instaladas con el eje en posición vertical, la carcasa, situada horizontalmente, tiene convenientemente distribuidos en su periferia unos conductos de paso de aire para aireación del rodete, lográndose, alrededor del mismo, el adecuado equilibrio de presiones. En el caso de turbinas con el eje horizontal, la aireación se efectúa desde la cámara de descarga.

2.7.3 Turbina Francis

Las turbinas de flujo mixto fueron inventadas por Jame B. Francis, por lo que se les conoce como turbinas Francis. En las turbinas Francis el agua fluye de la tubería de presión al sistema de distribución a través de un caracol o cámara espiral que se ubica alrededor del sistema de distribución de manera general las partes de la turbina Francis son: el caracol o cámara espiral, el anillo fijo, los álabes móviles, rodete, eje de la turbina y el tubo de aspiración.

En la figura 2.6 se muestra la representación de la turbina Francis.



Figura 2.6 Turbina Francis.

- Caracol o cámara espiral. Constituye el ducto alimentador de agua al rodete, es de sección circular y diámetro decreciente. Circunda el rodete y le entrega el agua requerida para la operación. El agua pasa del caracol al distribuidor guiada por unas paletas direccionales fijas a la carcasa.
- El distribuidor. El sistema de distribución posee una parte estacionaria denominada anillo fijo y los alabes fijos. Los álabes móviles en forma de persiana vertical y circular guían el agua hacia el rodete. La apertura de los álabes móviles se puede graduar por medio de un anillo localizador en la parte superior y accionado por servomotor hidráulico. En el distribuidor se transforma la energía de presión en energía cinética.
- El rodete. Es la rueda motriz propiamente y posee álabes que están endosados a una perpendicular al eje de la máquina. En el rodete se distingue la corona, la banda y los alabes curvados.
- Tubo de aspiración. También denominado difusor o tubo de desfogue consiste en una conducción en forma de sifón que une la turbina con el canal de descarga. tiene como función recuperar el máximo de energía cinética del agua a la salida del rodete.
- Eje de una turbina Francis. El eje de un grupo tiene ciertas peculiaridades cuando se encuentra instalado en posición vertical. Por medio del eje de turbina, al estar rígidamente unido mediante acoplamiento al eje del alternador, se transmite al rotor de este el movimiento de rotación necesario. Ahora bien, en este tipo de turbinas, es en la zona de eje correspondiente al alternador donde se suele disponer el medio para soportar todo el peso del conjunto, formado por ejes, rotor, rodete y empuje del agua sobre los álabes de este último. Tal medio, es el denominado cojinete de empuje, del cual nos ocuparemos oportunamente. Además del cojinete de empuje, el eje completo del grupo, dispone de hasta tres cojinetes guías. Dos de ellos están situados en la zona del alternador, y un tercero en la zona de Turbina.

Considerando los aspectos constructivos de los componentes de las turbinas Francis, se comprende con facilidad el funcionamiento de las mismas. En la mayoría de los casos, la instalación de este tipo de turbinas, se realiza en centrales para cuya alimentación de agua se requiere la existencia de un embalse. Otra particularidad en la ubicación de estas turbinas, radica en que el conjunto esencial de las mismas, es decir, cámara espiral – distribuidor – rodete – tubo de aspiración, se encuentra generalmente, a un nivel inferior respecto al nivel alcanzado por el agua en su salida hacia el cauce del río en dirección aguas abajo.

2.7.4 Turbina Kaplan

Son turbinas de reacción de flujo axial. Los álabes del rodete en las Kaplan son siempre regulables, mientras que los de los distribuidores, pueden ser fijos o regulables. Si ambos son regulables la turbina es una verdadera Kaplan; si sólo son regulables los del rodete, la turbina es una Semi-Kaplan. Para su regulación, los alabes del rodete giran alrededor de su eje, accionados por unas manivelas, que son solidarias de unas bielas articuladas a una cruceta, que se desplaza hacia arriba o hacia abajo por el interior del eje hueco de la turbina. Este desplazamiento es accionado por un servomotor hidráulico, con la turbina en movimiento. El dispositivo de accionamiento de los álabes de regulación de una turbina Kaplan de eje vertical, no es muy diferente del que equipan las turbinas Francis.

Son partes principales de una turbina Kaplan:

- Cámara espiral
- Distribuidor
- Rotor o rodete
- Tubo de aspiración.
- Eje

- Equipo de sellado
- Cojinete guía
- Cojinete de empuje

El único componente de las turbinas Kaplan, que podría considerarse como distinto al de las turbinas Francis, es el rotor o rodete.

El rotor de una turbina Kaplan es semejante a la hélice de barco, está formado por un número determinado de *palas* o *álaves*, de 2 a 4 para saltos de pequeña altura y de 5 e 9 cuando los saltos son mayores. Cada una de las palas del rodete están dotadas de libertad de movimiento, pudiendo orientarse dentro de ciertos límites, girando al unísono y uniformemente sobre sus asientos respectivos situados en el núcleo llamado también cubo del rodete según ejes radiales de la turbina. (Figura 2.7)



Figura 2.7 Rodete en una turbina Kaplan

Una de las características fundamentales de las turbinas Kaplan constituye el hecho que las palas del rotor están situadas a una cota más baja que la cota del distribuidor, de modo que el flujo del agua incide sobre las palas en su parte posterior en dirección paralela al eje de la turbina. En la figura 2.8 se muestra la incidencia del agua sobre las palas del rodete en una turbina Kaplan.

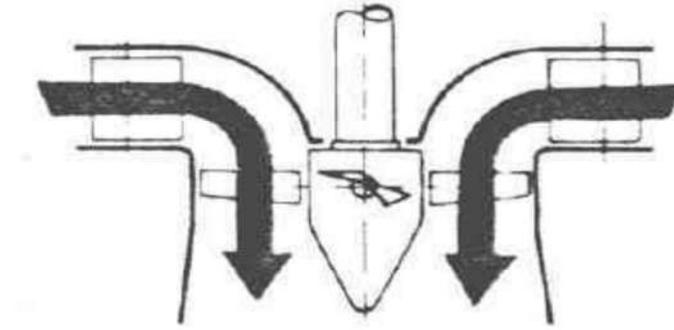


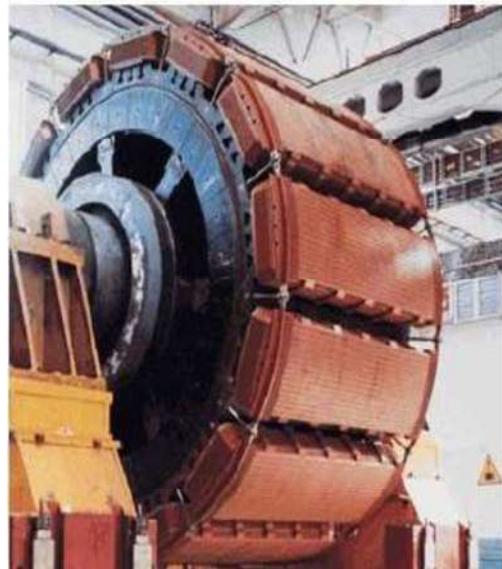
Figura 2.8 Incidencia del agua sobre las palas.

2.8 Generador Síncrono

Es la máquina que transforma la energía mecánica en eléctrica. Se le llama también **Alternador** porque produce corriente alterna. Está formado básicamente por dos elementos: uno fijo cuyo nombre genérico es el de **Estator** y otro que gira concéntricamente en éste, llamado **Rotor**. Uno de ellos debe crear un campo magnético, alimentado con corriente directa (corriente de excitación del campo), tomada de la excitatriz. A dicho elemento se le denomina inductor y está formado por un conjunto de bobinas. El inductor es el rotor. El segundo elemento actúa como receptor de corrientes inducidas, por lo que se llama inducido. A él están unidas las barras de salida de la corriente. El estator, pues, es el que ocupa el lugar del inducido. En la figura 2.9 se muestra el estator y rotor de un generador síncrono.



(a) Estator de la máquina síncrona



(b) Rotor de la máquina síncrona

Figura 2.9 Partes de las máquinas síncronas.

La corriente eléctrica se origina en el campo magnético establecido entre el rotor y el estator; al girar el rotor impulsado por la turbina se rompe el campo magnético produciéndose una corriente de electrones.

Capítulo 3

Modelo de una Central Hidroeléctrica

3.1 Introducción

Hoy en día la forma de modelar sistemas físicos debe ser eficiente con el objetivo de que el modelo se aproxime más al sistema físico deseado. En este capítulo se obtendrá el modelo físico de una central hidroeléctrica, la cuál se dividirá en subsistemas para determinar de una manera más sencilla su análisis, representando las partes físicas de la central (sistema hidráulico, sistema mecánico, sistema eléctrico). Teniendo definido cada uno de los sistemas, su análisis se determinará partiendo con el sistema hidráulico determinando las variables de salida para asociarlas con las variables de entrada de la turbina, de igual forma para la turbina se asocia las variables de salida para la entrada del generador síncrono. Las ecuaciones se representarán en variables de estado.

3.2 Obtención del modelo de la central hidroeléctrica

Para determinar el modelo físico de una central hidroeléctrica básica, lo dividiremos en subsistemas. Se analizará cada uno y posteriormente se realizará el acoplamiento de todos los subsistemas. En la figura 3.1 se muestra el diagrama completo de una central hidroeléctrica.

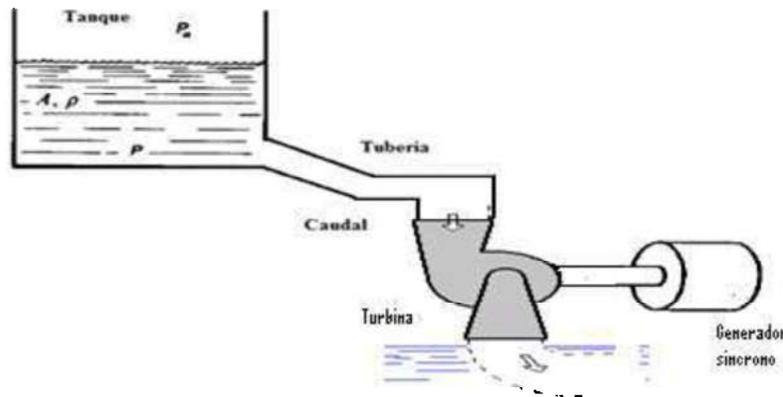


Figura 3.1 Diagrama de una central hidroeléctrica.

Partiendo de un modelo físico completo, se hace la división en subsistemas que representan una central hidroeléctrica, de esta manera se obtiene los siguientes modelos:

- a. Modelo hidráulico
- b. Modelo mecánico
- c. Modelo eléctrico

De manera general, se obtendrá para cada uno de los subsistemas el modelo equivalente representado en espacio de estado.

3.3 Elementos básicos en el modelado del sistema hidráulico

Los elementos básicos que se requieren para la construcción de un sistema hidráulico, se describen a continuación.

3.3.1 Resistencia hidráulica

Es la oposición que presentan las tuberías al paso del fluido y se llama comúnmente válvula, la cual representa la resistencia. En la figura 3.2 se muestra la representación de una resistencia hidráulica.

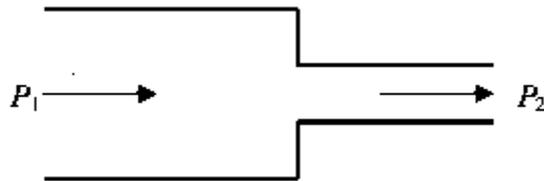


Figura 3.2 Resistencia hidráulica.

Las variables involucradas con este elemento son presión y caudal. Su comportamiento físico está dado por:

$$\Delta P = P1 - P2 = RH \quad (3.1)$$

donde:

ΔP es el incremento de presión a través de la resistencia hidráulica. $[Pa]$

Q es el caudal que fluye a través de la resistencia hidráulica $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

RH es el valor de la resistencia hidráulica que presentan las paredes de la tubería (en este caso se utilizará una válvula). $\left[\frac{Pa \cdot s}{m^2}\right]$

3.3.2 Capacitancia hidráulica

Esta representa físicamente el área de la presa. En la figura 3.3 se muestra la capacitancia hidráulica.

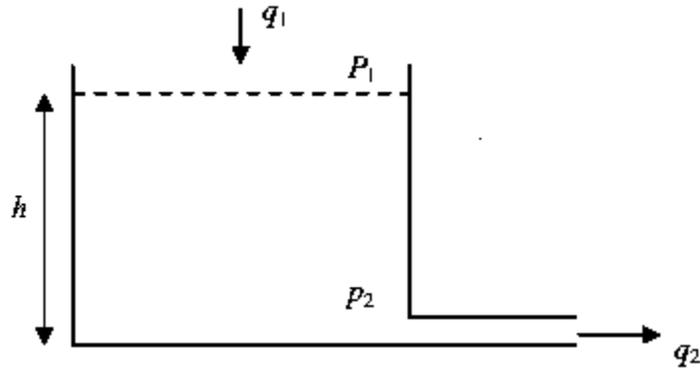


Figura 3.3 Capacitancia hidráulica.

Las variables involucradas con este elemento son presión y caudal. Su comportamiento físico está dado por:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{C_H} q \quad (3.2)$$

donde:

P es la presión en el fondo del tanque. $[Pa]$

q es el caudal que fluye a través del tanque. $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

C_H es el valor que tiene la capacitancia hidráulica. $\left[\frac{m^3}{Pa}\right]$

3.4 Modelo Hidráulico

Después de describir los elementos hidráulicos, se separa el modelo hidráulico, de los demás subsistemas. En la figura 3.4 se muestra el modelo ideal para esta central hidroeléctrica.

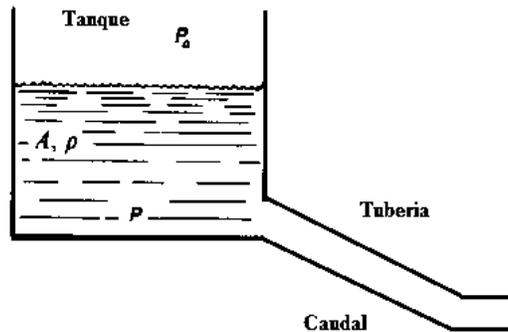


Figura 3.4 Modelo hidráulico ideal.

3.4.1 Obtención del modelo hidráulico en espacio de estado

$$\Delta P = P_1 - P_2 = Rq \quad (3.3)$$

$$R = \frac{\Delta P}{\Delta q} = \frac{dP}{dq} = \frac{P}{q} \quad (3.4)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{C_H} q \quad (3.5)$$

$$q = KP \quad (3.6)$$

$$q_i - q_0 = C \frac{dP}{dt} \quad (3.7)$$

$$q_0 = \frac{P}{R} \quad (3.8)$$

$$CdP = (q_i - q_0)dt \quad (3.9)$$

Sustituyendo (3.8) en (3.9)

$$CdP = \left(q_i - \frac{P}{R}\right) dt \quad (3.10)$$

$$RCdP = (q_i - P)dt \quad (3.11)$$

$$RC \frac{dP}{dt} + P = Rq_i \quad (3.12)$$

Después de tener la expresión

$$x_1 = P \quad (3.13)$$

$$x_2 = q_i \quad (3.14)$$

Derivando las ecuaciones (3.13) y (3.14) se tiene las siguientes expresiones

$$\dot{x}_1 = \frac{dP}{dt} \quad (3.15)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dq_i}{dt} \quad (3.16)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{q_i}{C} - \frac{P}{RC} \quad (3.17)$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{x_1}{RC} + \frac{x_2}{C} \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{dq}{dt} = \frac{P}{R} \quad (3.19)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{R} \quad (3.20)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ \frac{1}{R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3.5 Elementos básicos en el modelado del sistema mecánico

Los elementos básicos que se requieren para la construcción de un sistema mecánico, se describen continuación.

3.5.1 Resistencia mecánica

Existen dos tipos

- a. Amortiguador traslacional o fricción viscosa
- b. Amortiguador rotacional o torsional

Amortiguador traslacional o fricción viscosa tiene una característica fuerza velocidad. En la figura 3.5 se muestra la representación de una resistencia mecánica.

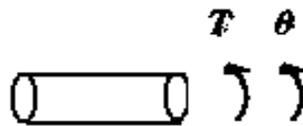


Figura 3.5 Resistencia rotacional.

Las variables que componen al amortiguador rotacional son par (T) y velocidad angular (θ), su comportamiento está dado por:

$$T_B = B_\theta \frac{d\theta}{dt} \quad (3.22)$$

T_B es el par producido por el amortiguador rotacional, se opone al giro de este y es igual al par externo aplicado [$N \cdot m$]

$\frac{d\theta}{dt}$ es la velocidad angular a la que gira el amortiguador rotacional y se representa por [rad/seg]

B_θ es el valor de la constante de amortiguador rotacional. $\left[\frac{N \cdot M}{\frac{rad}{seg}} \right]$

3.5.2 Capacitancia mecánica

Existen dos tipos

- a. traslacional o masa
- b. rotación o inercia

Se analizará en particularidad la capacitancia de rotación en la figura 3.6 se muestra la figura de la capacitancia rotacional.

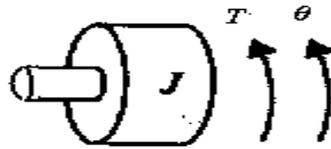


Figura 3.6 Capacitancia de rotación.

Las variables que componen al amortiguador rotacional son par y velocidad angular, su comportamiento está dado por:

$$T_J = J \frac{d^2\phi}{dt^2} \quad (3.23)$$

T_J : es el par, que producido por la inercia, se opone al movimiento de esta y es igual al par externo aplicado $[N.m]$

$\frac{d^2\phi}{dt^2}$: es la aceleración angular a la cual gira la inercia y se representa generalmente por $[rad/seg]$

J : es el valor de la inercia o capacitancia mecánica rotacional. $\left[\frac{Kg.m^2}{rad}\right]$

En la figura 3.7 se ilustra un esquema de una turbina hidráulica, la cuál internamente tiene una capacitancia de rotación.

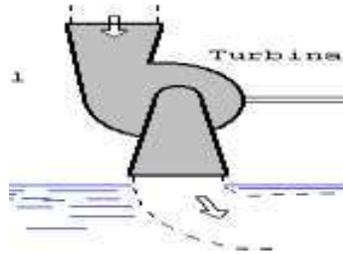


Figura 3.7 Esquema de una turbina hidráulica.

3.6 Generador síncrono

En la mayor parte del mundo donde se tienen sistemas de potencia son utilizadas las máquinas síncronas empleadas en turbinas hidráulicas o de vapor o en maquinaria de combustión. El principal objetivo de la máquina síncrona es la de convertir energía mecánica a eléctrica. El comportamiento eléctrico y electromecánico de la mayoría de las máquinas síncronas puede ser determinado por las ecuaciones, que describen las tres fases de la máquina síncrona de polos salientes. En particular las ecuaciones pueden emplearse para predecir el desempeño directamente en generadores síncronos y en pequeñas modificaciones de las inductancias del motor.

El rotor de la máquina síncrona está construido con un devanado de campo en este caso se analizará sin devanados de amortiguamiento y por lo general todos los devanados del rotor tienen diferentes características eléctricas. Por otro lado, el rotor de la máquina síncrona de polos salientes es magnéticamente asimétrico. Como resultado de esta asimetría, un cambio de variables del rotor no ofrece ninguna ventaja. Sin embargo, un cambio en las variables del estator es beneficioso. En la mayoría de los casos, las variables del estator son cambiadas a un marco de referencia fijo con el rotor (Transformación de Park) como sea las variables del estator también pueden ser expresadas en cualquier marco de referencia, lo cuál es conveniente para algunas simulaciones en computadora.

3.6.1 Descripción física de la máquina síncrona

La figura 3.7 muestra una máquina síncrona de tres fases con un par de polos y un devanado de campo. La máquina consiste de dos elementos básicos que son el campo y la armadura.

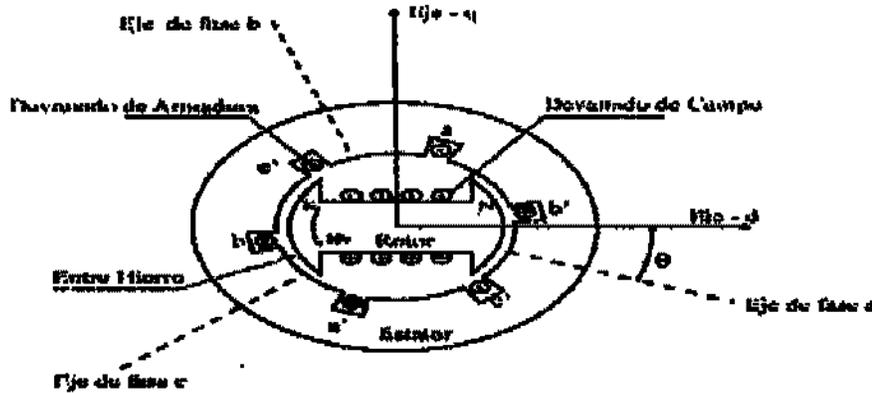


Figura 3.8 Esquema de una máquina síncrona.

También en la figura 3.8 muestra la ubicación de los elementos más importantes del devanado del inducido, así como la distribución de fases en la máquina del entre hierro a-á, b-b', c-c' la ω que es la frecuencia angular del rotor, θ que es el ángulo que proporciona la posición del motor. Los voltajes que se encuentran en los devanados de la armadura son más altos que los que se tienen en el devanado de campo. Las tres fases en la máquina se encuentran distribuidos 120° entre ellas. Con una rotación uniforme del devanado de campo en el generador el desplazamiento producido será de 120° en tiempo de fase. Debido a que la armadura está sujeta a variaciones del flujo magnético el acero del estator es construido con láminas delgadas para reducir las pérdidas por las corrientes de Eddy.

Cuando se tienen corrientes balanceadas en las tres fases la armadura producirá la velocidad síncrona un campo giratorio en el entre hierro para crear un par estable los campos del estator y del rotor deben rotar a la misma velocidad.

Las turbinas hidráulicas operan a bajas velocidades, por lo tanto, esto lleva a que estén formadas por un número mayor de polos para generar la frecuencia requerida. Bajo condiciones de estado estable la única corriente que existe en el rotor es decorriente directa en el devanado de campo.

3.6.2 Eje de Cuadratura q y eje de directa d

Para identificar las características de la maquina síncrona se definen dos ejes:

- El eje d , alineado al eje del polo norte magnético.
- El eje de cuadratura q , se encuentra a 90 grados eléctricos del eje $-d$.

La posición relativa del rotor al estator es medida por el ángulo θ entre el eje $-d$ y el eje magnético de la fase.

3.6.3 Representación esquemática de la máquina síncrona

Para determinar las ecuaciones se hace las siguientes consideraciones.

- Los devanados del estator se encuentran distribuidos sinusoidalmente a lo largo del entre hierro.
- La máquina es de dos polos.
- La máquina es de polos salientes.
- Las ranuras del estator no crean una variación considerable en las inductancias con la posición que tenga el rotor.
- La histéresis magnética es despreciable.
- Los efectos de saturación magnética son despreciables.

En la figura 3.9 se muestra un diagrama eléctrico en coordenadas d - q de una máquina síncrona.

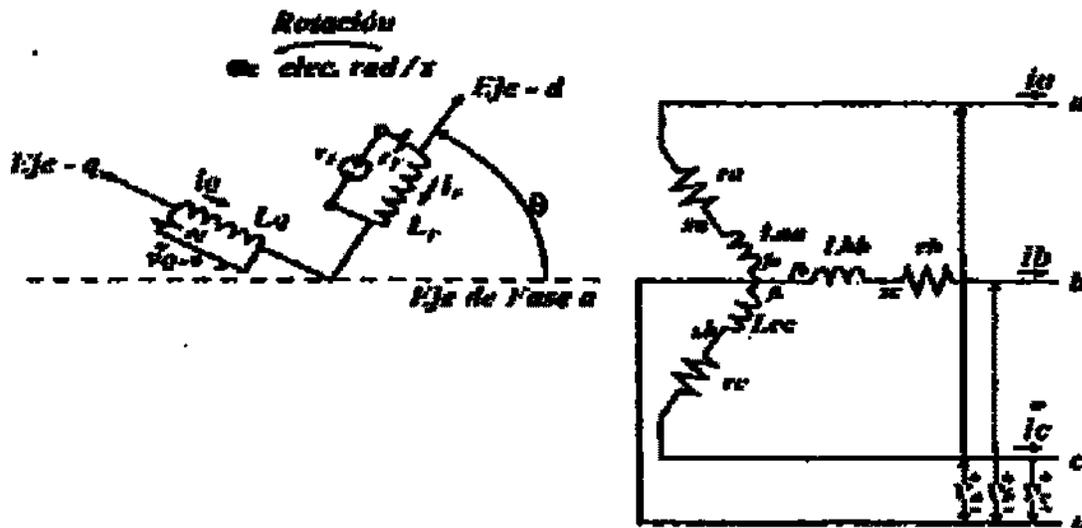


Figura 3.9 circuito de estator y rotor de la máquina síncrona.

La notación que describe los subíndices de la figura son:

a, b, c denotan devanados de fase del estator. Por tanto, $ia(t), ib(t), ic(t)$ denotan las corrientes del estator,

$\theta(t)$ es el ángulo donde el eje-d adelanta el eje magnético del devanado de la fase a.

$\omega_r(t)$ denota la velocidad angular del rotor en rad/seg.

$\omega(t)$ denota la velocidad angular del campo magnético en rotación en rad/seg

3.7 Transformación de Park

Usualmente una gran simplificación en la descripción de la máquina síncrona se obtiene mediante la transformación de variables, esto es la transformación de Park. Esta transformación expresa las variables del estator como corrientes, voltajes o

enlaces de flujo en un nuevo conjunto de variables. Los nuevos resultados son obtenidos a partir de variables actuales en los tres ejes; eje-d, eje-q, y eje estacionario. Esta transformación convierte las cantidades del estator a partir de las fases a, b y c en otras variables de referencia las cuales se mueven con el rotor. Partiendo de las variables, $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ se requieren tres nuevas variables de la transformación de Park, dos para los ejes d y q, las cuales son proporcionales a la corriente de secuencia cero. Un multiplicador es utilizado para reducir los cálculos numéricos, donde la transformada de la park se muestra a continuación.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta(t) & \cos[\theta(t) - 2\pi/3] & \cos[\theta(t) + 2\pi/3] \\ \sin \theta(t) & \sin[\theta(t) - 2\pi/3] & \sin[\theta(t) + 2\pi/3] \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$i_{0dq}(t) = P i_{abc}(t) \quad (3.25)$$

$$i_{dq0}(t) = \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix}; i_{abc}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta(t) & \sin \theta(t) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos[\theta(t) - 2\pi/3] & \sin[\theta(t) - 2\pi/3] \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos[\theta(t) + 2\pi/3] & \sin[\theta(t) + 2\pi/3] \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Notamos que $P^{-1}=P^T$ lo cual significa que la transformación P es ortogonal. Teniendo P ortogonal también significa que la transformación P es de potencia invariante, entonces se tiene la misma expresión de potencia en términos de a-b-c ó d-q-0, es decir,

$$P(t) = v_{abc}^T(t) i_{abc}(t) = v_{dq0}^T(t) i_{dq0}(t) \quad (3.28)$$

3.7.1 Ecuaciones de Enlace de flujo

Considerando la figura 3.8 la cuál es una red de 4 bobinas acopladas mutuamente

$$\begin{bmatrix} \lambda_a(t) \\ \lambda_b(t) \\ \lambda_c(t) \\ \lambda_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Las inductancias propias de cada devanado están dadas por,

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cos 2\theta(t) \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2[\theta(t) - 2\pi/3] \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2[\theta(t) + 2\pi/3] \end{aligned} \quad (3.30)$$

donde $L_s > L_m$
 L_s y L_m son constantes

Inductancias propias del Rotor

$$L_{FF} = L_F \quad (3.31)$$

Las inductancias mutuas entre fase son función de $\theta(t)$ y son simétricas

$$\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} - M_s - L_m \cos 2[\theta(t) + \pi/6] \\ L_{bc} &= L_{cb} - M_s - L_m \cos 2[\theta(t) + 5\pi/6] \\ L_{ca} &= L_{ac} - M_s - L_m \cos 2[\theta(t) + 5\pi/6] \end{aligned} \quad (3.32)$$

donde $|-M_s| > L_m$.

Inductancias mutuas entre estator y rotor, son funciones del ángulo del rotor $\theta(t)$ del devanado de fase al devanado de campo se tiene:

$$\begin{aligned} L_{aF} &= L_{Fa} = M_f \cos \theta(t) \\ L_{bF} &= L_{Fb} = M_f \cos[\theta(t) - 2\pi/3] \\ L_{cF} &= L_{Fc} = M_f \cos[\theta(t) + 2\pi/3] \end{aligned} \quad (3.33)$$

L_{aa} denota una matriz de inductancia en el estator-rotor, L_{aR} , L_{Ra} las inductancias estator-rotor y L_{RR} las inductancias del rotor.

Se observa que con inductancias variantes en el tiempo pueden simplificadas refiriendo todas las cantidades del marco de referencia del rotor a través de la transformación de Park aplicando la transformación a - b - c .

Multiplicando (3.29) por la transformada de park P

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{abc}(t) \\ \lambda_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{aR} \\ L_{Ra} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & I_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc}(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Realizando la operación obtenemos

$$\begin{bmatrix} \lambda_d(t) \\ \lambda_q(t) \\ \lambda_0(t) \\ \lambda_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{dF} \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 \\ 0 & M_{dF} & 0 & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

dónde:

$$\begin{aligned} L_d &= L_s + M_s + \left(\frac{3}{2}\right)L_m \\ L_q &= L_s + M_s - \left(\frac{3}{2}\right)L_m \\ L_0 &= L_s - 2M_s \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.7.2 Ecuación de voltaje

Considerando los circuitos de una máquina síncrona que se muestra en la figura 3. 9 la ecuación matricial particionada está dada por

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \\ v_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_a(t) \\ \lambda_b(t) \\ \lambda_c(t) \\ \lambda_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

A la ecuación de voltaje aplicando la transformada de Park y considerando condiciones balanceadas con la secuencia cero igual a cero, se tiene que

$$\text{donde; } PP^{-1} \lambda_{0dq}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \omega(t)\lambda_d & -\omega(t)\lambda_d \end{bmatrix}$$

De esta manera la matriz de transformación está dada por:

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & 0 \\ 0 & r_q & 0 \\ 0 & 0 & r_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega(t)\lambda_d \\ -\omega(t)\lambda_d \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_d(t) \\ \lambda_q(t) \\ \lambda_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

3.8 Formulación de Ecuaciones de Espacio de Estado

Recordar que nuestro objetivo es derivar un conjunto de ecuaciones que describan la máquina síncrona en la forma;

$$\dot{X}(t) = f[X(t), v(t), t] \quad (3.39)$$

Donde $x(t) \in R^n$ denota un vector de variables de estado $u(t) \in R^p$ las funciones de entrada del sistema y $f[x(t), v(t), t]$, es un conjunto de funciones no lineales que representan el producto de algunas variables de estado.

$$x(t)^T = [i_d(t), i_q(t), i_F(t)] \quad (3.40)$$

El conjunto basado en enlaces de flujo como variables de estado.

$$x(t)^T = [\lambda_d(t), \lambda_q(t), \lambda_F(t)] \quad (3.41)$$

3.8.1 Formulación de corriente

Un modelo basado en corrientes como variables de estado tiene la ventaja de ofrecer relaciones simples entre los voltajes y las variables de estado.

Podemos remplazar los términos en $\lambda(t)$ y $\dot{\lambda}(t)$ por términos en $i(t)$ y $\frac{di(t)}{dt}$ utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \lambda_d(t) \\ \lambda_q(t) \\ \lambda_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_F \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{dF} & 0 & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Rescribiendo (3.38) para sustituir (3.42) en (3.38)

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & \omega(t)L_q & 0 \\ -\omega(t)L_d & r_q & 0 \\ 0 & 0 & r_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_F \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{dF} & 0 & L_F \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

3.8.2 Ecuación de onda normalizada

Hay muchas formas de escribir la ecuación de onda en la dinámica de un sistema de potencia, mientras que el par está casi siempre dado por pu , frecuentemente no es claro para $\omega(t)$ y t iniciando con $\omega(t)$ en pu tenemos que:

$$\frac{2H}{\omega_B(t)} \frac{d\omega(t)}{dt} = 2H \frac{d\omega(t)}{dt_u} = T_a(t) \quad (3.44)$$

donde H denota la constante de inercia en pu , ω_B es la velocidad angular base y T_a la aceleración del par en pu y siendo $t_u = \omega_B(t)$ está en pu entonces

$$T_j \frac{d\omega(t)}{dt} = T_a(t) \quad (3.45)$$

$$T_j = 2H\omega_B \quad (3.46)$$

Los pares aplicados a un rotor de una maquina síncrona son $T_e(t)$ el par electromagnético y $T_m(t)$ es el par mecánico mostrado en la figura 3.10.

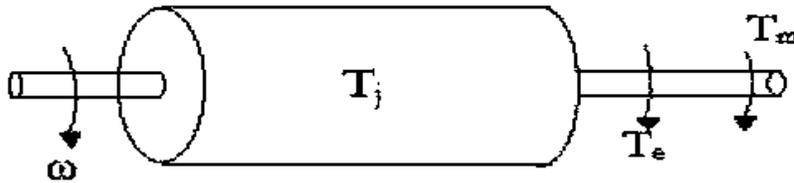


Figura 3.10 Pares aplicados al rotor de una máquina síncrona.

De la figura 3.10 Se tiene en pu

$$T_a(t) = T_m(t) - T_e(t) \quad (3.47)$$

donde

$$T_e(t) = i_d(t)\lambda_d(t) - i_q(t)\lambda_q(t) \quad (3.48)$$

Sustituyendo (3.42), (3.47) en (3.45), tenemos

$$T_{j\omega}(t) = T_m(t) + [-L_d i_q(t) - M_{dF} i_q L_q i_d(t)] \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Finalmente, es posible obtener la formula complete de corriente de la máquina síncrona es,

Tomando (3.46), (3.47) y (3.40) el modelo completo está dado por:

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_F(t) \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega(t)L_q & 0 \\ -\omega(t)L_d & r_q & 0 & v_q(t) \\ 0 & 0 & r_F & 0 \\ T_m & T_m & T_m & T_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} L_d M_{dF} & 0 & 0 \\ 0 & r_q & 0 & v_q(t) \\ 0 & 0 & r_F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_j \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad pu(3.50)$$

Una vez, que se obtuvo el modelo matemático en espacio de estado de la máquina síncrona, se acoplará a los subsistemas mecánicos e hidráulicos para formar la central hidroeléctrica, esto con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables de la central, lo cuál se realizara en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Simulación

de una Central

Hidroeléctrica

4.1 Introducción

Desde inicios del siglo se han desarrollado métodos y herramientas para los diversos entornos de simulación. Con esto se han resuelto gran cantidad de problemas y se han obtenido resultados con mayor credibilidad de los sistemas físicos siendo un lenguaje de modelado, que soporta la descripción de los subsistemas es esencial para el análisis de las interacciones entre estos. Una vez teniendo en cuenta cada uno de los subsistemas que representa una central hidroeléctrica se obtendrá de manera individual la simulación de cada uno de los modelos en un software de simulación llamado 20-Sim, para después obtener el acoplamiento de los sistemas y determinar el comportamiento de la central.

4.2 Descripción Dinámica de los Diagramas de Bloques en 20-Sim

El programa 20-Sim es un software de modelado y simulación que se utiliza para simular el comportamiento de sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos y la combinación de estos de una manera sencilla y directa.

Este simulador permite utilizar diagramas de bloques que es la representación del funcionamiento interno de un sistema mediante bloques y sus relaciones donde se representa el modelo matemático para representar el modelo físico en el cual intervienen gran cantidad de variables que se relacionan en todo proceso.

A continuación se describirá cada uno de los elementos que conforman la simulación del generador síncrono.

4.2.1 Señal de entrada senoidal

Es una señal senoidal de entrada que representa el voltaje o corriente en función alterna para el sistema analizar.

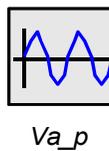


Figura 4.1 Bloque de señal senoidal.

En la figura 4.1 se representa el voltaje senoidal, en el cuál tenemos los parámetros de la amplitud de onda y velocidad angular. Así mismo, la programación interna del diagrama de bloques es de la siguiente forma:

parameters

```
real Frec = 60.0 {Hz};
```

variables

```
boolean hidden change;
```

```
real hidden half;
```

equations

```
"calculate at least 2 points per cycle to get a triangle"
```

```
half = pi / ( 2 * pi * Frec );
```

```
change = frequencyevent (half, half / 2);
```

```
"calculate the sine wave"
```

```
output = amplitude * sin ( ( 2 * pi * Frec ) * time + ( pi / 2 ) + 0);
```

4.2.2 La ganancia

La ganancia es uno de los bloques más importantes del simulador es donde la señal de entrada será afectada por dicha ganancia para obtener una señal de respuesta. Mostrando a continuación la representación del bloque de ganancia en la figura 4.2.



Figura 4.2 Bloque de la ganancia.

En la figura 4.2 se representa un bloque de ganancia de un sistema donde el bloque muestra el argumento de un número real. Del bloque que se seleccionó en el programa se muestra las señales para obtener la salida en eje de cuadratura y directo donde estas son afectadas por la ganancia del bloque T_P . La programación interna del bloque es la siguiente:

Variables real teta;

$$\text{Equationsteta}=2*\text{pi}*F*\text{time};$$

$$V_{o1} = \text{sqrt}(2/3) * (V_{a1}/\text{sqrt}(2)+V_{b1}/\text{sqrt}(2)+V_{c1}/\text{sqrt}(2));$$

$$V_{d1} = \text{sqrt}(2/3)* (V_{a1}*\cos(\text{teta})+V_{b1}*\cos(\text{teta}-2*\text{pi}/3)+V_{c1}*\cos(\text{teta}+2*\text{pi}/3));$$

$$V_{q1} = \text{sqrt}(2/3)* (V_{a1}*\sin(\text{teta})+V_{b1}*\sin(\text{teta}-2*\text{pi}/3)+V_{c1}*\sin(\text{teta}+2*\text{pi}/3));$$

4.2.3 Sumador

Este bloque representa una suma o diferencia de funciones, la figura 4.3 muestra el bloque del sumador donde los argumentos de entrada representa las funciones de entrada para obtener una salida dependiendo de la función ya sea suma o resta.

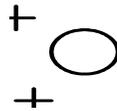


Figura 4.3 Bloque del sumador.

4.2.4 Gráficador

El gráficador es un diagrama de bloques en el cuál muestra el comportamiento de la variables involucradas en el modelo, permitiendonos observar la respuesta del sistema. En la figura 4.4 se muestra el gráficador teniendo en cuenta que en este bloque no recibe parámetros por parte del usuario los recibe del programa para representar el comportamiento del sistema.

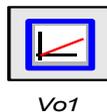


Figura 4.4 Bloque del gráficador.

4.2.5 Bloque dinámico

En este bloque se tiene encapsulamiento que permite modificar si se quiere modificar la forma específica de este bloque donde estos contienen por lo menos un parámetro o acción asociada al parámetro donde se puede tener las propiedades, posiciones, distancias y ángulos para la geometría del bloque. En la figura 4.5 se muestra la representación del bloque dinámico.



Figura 4.5 Bloque dinámico.

4.3 Diagrama del Sistema Hidráulico

Para representar el sistema hidráulico primero se muestra su representación en variables de estado y posteriormente en diagrama de bloques.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ \frac{1}{R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix}$$

En la tabla 4.1 se muestra los valores que se tomaron para la simulación del sistema hidráulico.

Variables	Valores
R	$1 \frac{Pa \cdot s}{m^3}$
C	$-1 \frac{m^3}{Pa}$
\dot{x}_1 (A)	15 Pa
\dot{x}_2 (B)	$150 m^3/s$

Tabla 4.1 Valores del sistema hidráulico.

A continuación se muestra en la figura 4.6 el esquema de simulación del sistema hidráulico representado en diagramas de bloques.

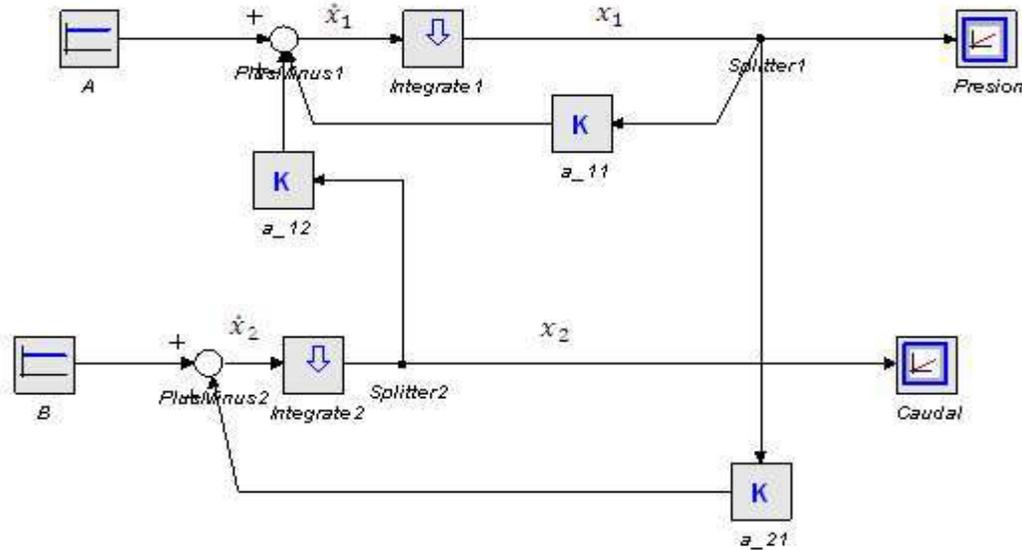


Figura 4.6 Sistema Hidráulico.

En la figura 4.6 se tiene la representación del sistema hidráulico en diagramas de bloques. Observamos las variables que lo conforman donde las constantes de voltaje representa el flujo laminar del agua que para este caso es constante, las ganancias indican las variables que involucra la capacitancia y la resistencia del sistema donde las salidas: A es la presión y B es el caudal.

A continuación se muestra la figura 4.7 la representación del comportamiento de las variables de salida del sistema hidráulico donde se tiene en estado estable para su acoplamiento con el sistema mecánico.

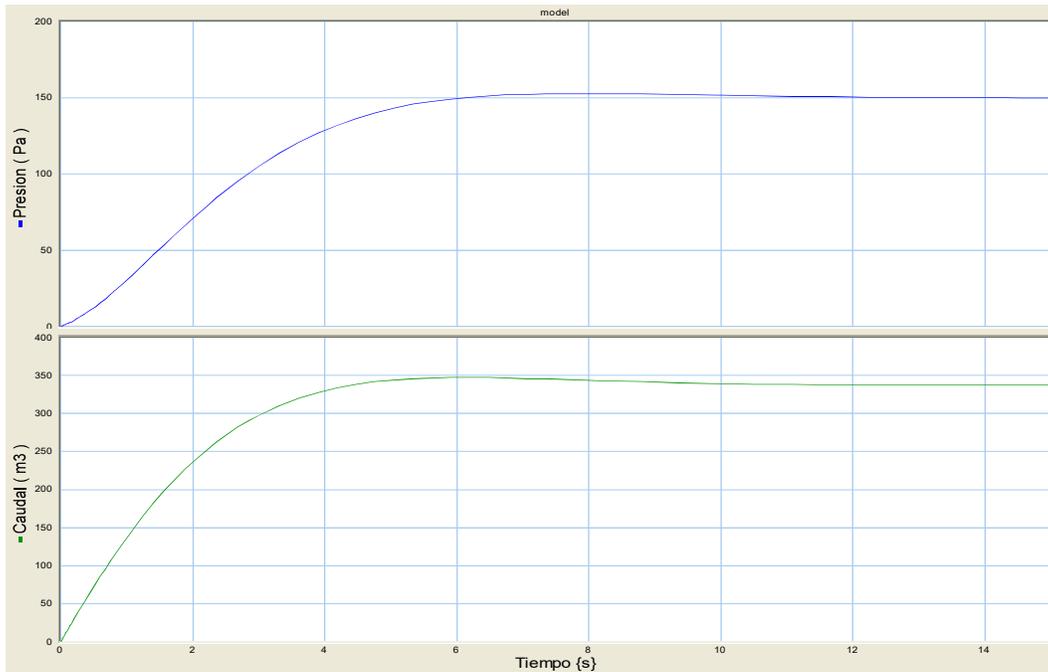


Figura 4.7 Gráfica de presión y caudal del sistema hidráulico.

En la figura 4.8 se muestra el sistema hidráulico con la ganancia TM como el par mecánico para acoplar el generador síncrono donde en la tabla 4.2 se muestra los valores que se tomaron para la simulación.

Variables	Valores
P	4
TM	4N.m

Tabla 4.2 Valores del sistema mecánico

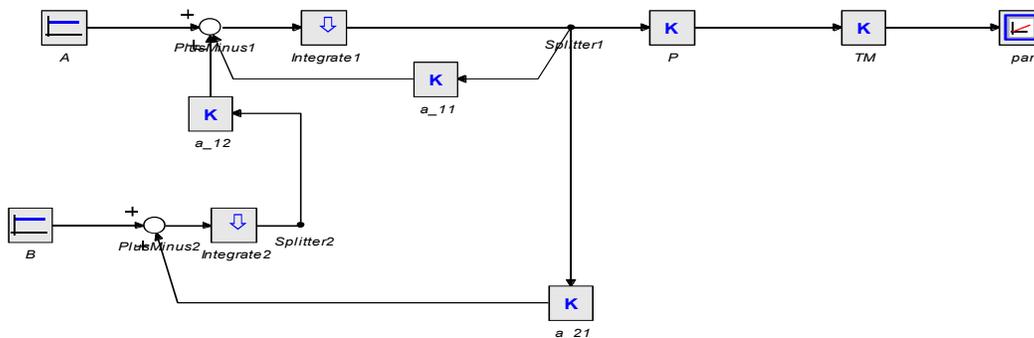


Figura 4.8 Sistema hidráulico-mecánico.

En la figura 4.8 se observa que se acoplan dos ganancias al sistema hidráulico de la cuál la primer ganancia Pes donde entra la presión del sistema hidráulico la cuál representa el acoplamiento entre el sistema hidráulico y el mecánico apartir de esto se toma la ganancia TM como la turbina hidráulica para proporcionar el par mecánico para acoplar el generador sincrónico.

En la figura 4.9 se muestra la simulación del sistema hidráulico-mecánico donde se observa el acoplamiento entre el sistema hidráulico y la turbina hidráulica la cual está representada por la ganancia TM donde en el graficador se observa el par mecánico otorgado por la turbina hidráulica.

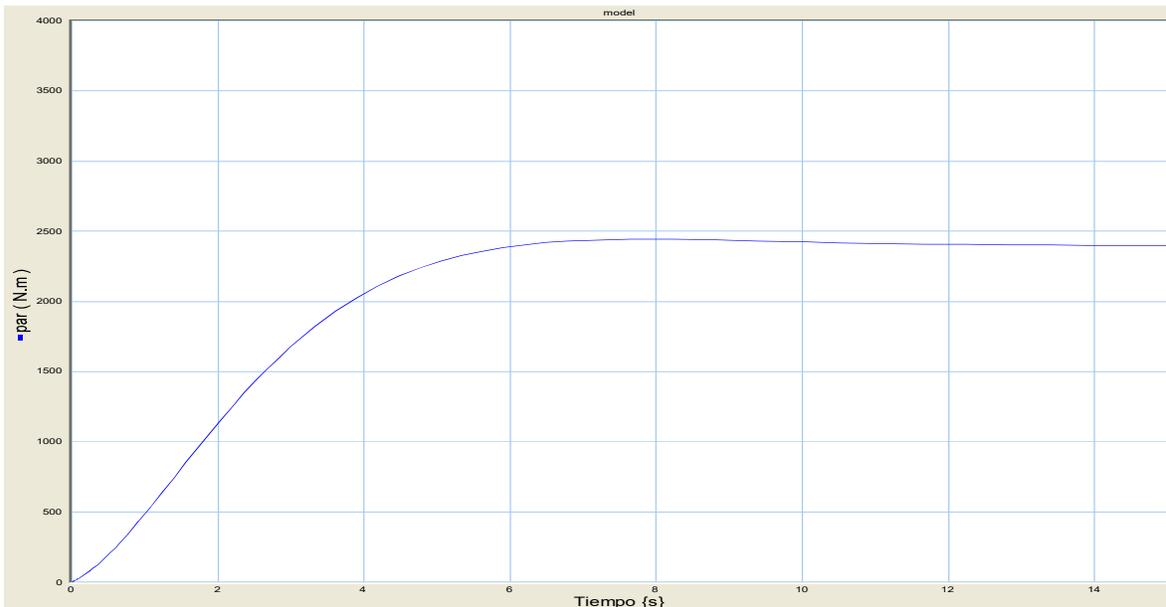


Figura 4.9 Gráfica del par mecánico.

En la figura 4.10 se muestra un comportamiento similar a la gráfica de la figura 4.9, donde se aumento el caudal de agua donde en la grafica 4.11 se observa un par mecánico mayor al de la gráfica de la figura 4.9. En este caso se incrementa de $150[m^3/s]$ a $200 [m^3/s]$ el caudal de agua, esto hace que la turbina hidráulica entregue un par mecánico mayor.

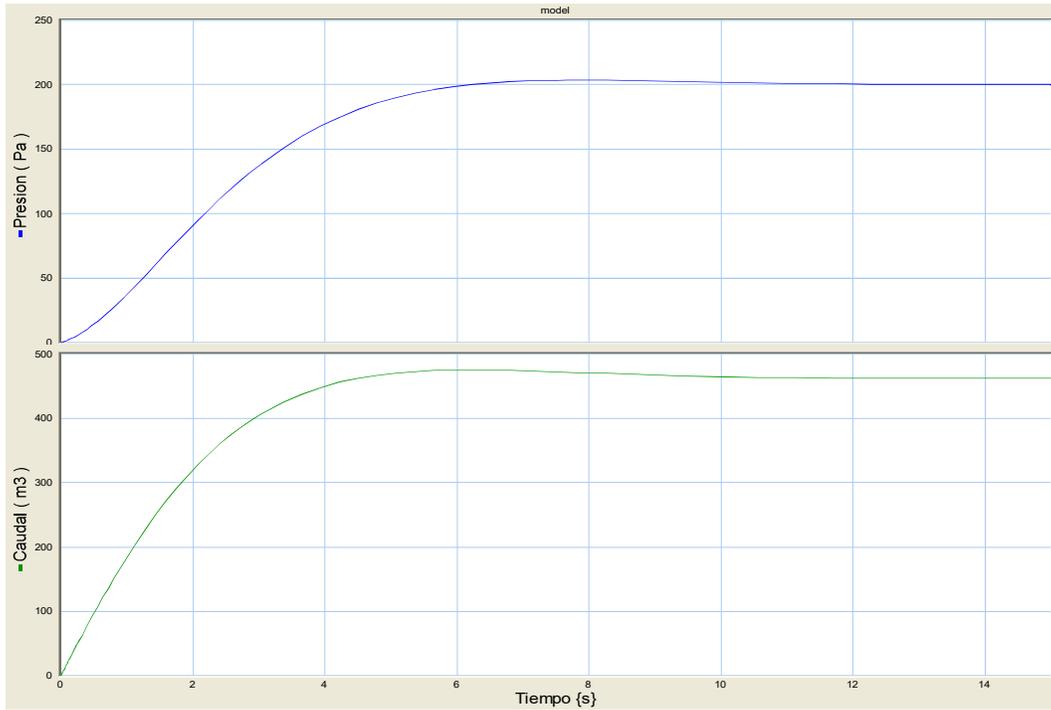


Figura 4.10 Aumento en el caudal del agua.

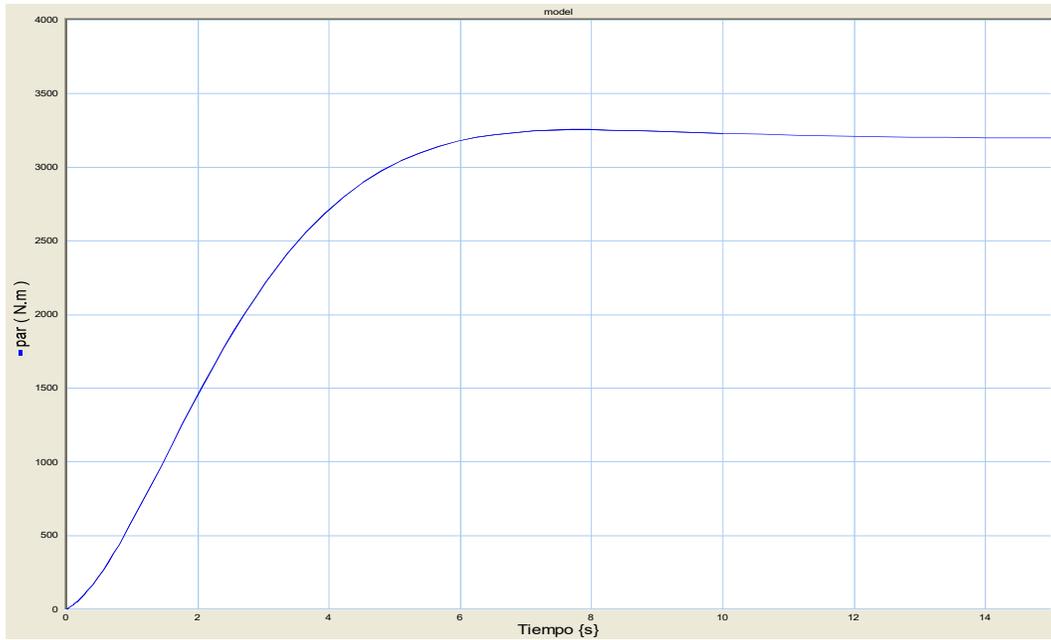


Figura 4.11 Gráfica que muestra un par mecánico mayor.

4.4 Simulación de un generador síncrono

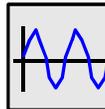
La ecuación de estado está dada por $\dot{x}=A(x) + Bu$ que rige el comportamiento del eje directo, del devanado de campo, del eje de cuadratura y la velocidad angular del generador síncrono que se da en la ecuación (4.2).

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d L_1 - r_F L_2 & 0 & -\lambda_q L_1 \\ -r_d L_3 - r_F L_4 & 0 & -\lambda_q L_3 \\ 0 & \frac{\lambda_d}{L_q} & \frac{\lambda_d}{L_q} \\ \frac{\lambda_q}{T_J} & 0 & \frac{-\lambda_d}{T_J} \\ 0 & 0 & \frac{-D}{T_J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 e_1 + L_2 e_6 \\ L_3 e_1 + L_4 e_6 \\ \frac{1}{L_q} e_{12} \\ \frac{1}{T_J} e_{16} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} e_1 + b_{12} e_6 \\ b_{21} e_1 + b_{22} e_6 \\ b_{31} e_{12} \\ b_{41} e_{16} \end{bmatrix}$$

Donde: $f_3 = i_d$ corriente en el eje directo, $f_5 = i_F$; corriente en el devanado de campo $f_{11} = i_q$; corriente en el eje de cuadratura $f_{18} = \omega$; velocidad angular.

Esta es la simulación de un generador síncrono en el cuál se puede ver tres señales de entrada del estator de onda senoidal V_a , V_b y V_c con su eje de cuadratura y eje directo a través de una ganancia unitaria, los parámetros de la onda sinusoidal son:



V_{a_p}

Figura 4.12 Señal de entrada senoidal V_{a_P} .

La programación de este bloque es,

Parameters

RealFrec = 60.0 {Hz};

variables

boolean hidden change;

real hidden half;

equations

"calculate at least 2 points per cycle to get a triangle"

half = pi / (2 * pi * Frec);

change = frequencyevent (half, half / 2);

"calculate the sine wave"

output = amplitude * sin ((2 * pi * Frec) * time + (pi / 2) + 0);

En la figura 4.13 se muestra el bloque de ganancia donde la salida de esta será afectada por la ganancia que se le dé a este. Este bloque es modificado para introducir la transformada de park, de la siguiente manera.



Figura 4.13 Ganancia.

Variables real teta;

Equations teta=2*pi*F*time;

Vo1 = sqrt(2/3) * (Va1/sqrt(2)+Vb1/sqrt(2)+Vc1/sqrt(2));

Vd1 = sqrt(2/3)* (Va1*cos(teta)+Vb1*cos(teta-2*pi/3)+Vc1*cos(teta+2*pi/3));

Vq1= sqrt(2/3)* (Va1*sin(teta)+Vb1*sin(teta-2*pi/3)+Vc1*sin(teta+2*pi/3));

En la figura 4.14 se muestra el bloque de ganancia, donde la salida de esta será afectada por la ganancia que se le dé a este. El bloque es modificado para introducir la transformada de park inversa.

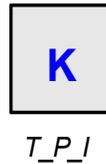


Figura 4.14 Transformada de park inversa.

variables

realteta;

equations

teta=2*pi*F*time;

Va1 = sqrt(2/3) * (Vo1/sqrt(2)+Vd1*cos(teta)+Vq1*sin(teta));

Vb1 = sqrt(2/3)* (Vo1/sqrt(2)+Vd1*cos(teta-2*pi/3)+Vq1*sin(teta-2*pi/3));

Vc1= sqrt(2/3)* (Vo1/sqrt(2)+Vd1*cos(teta+2*pi/3)+Vq1*sin(teta+2*pi/3));

En la figura 4.15 se muestra la forma en que está constituido el circuito interno del bloque dinámico. Donde se representa la impedancia propia del eje de cuadratura, el eje directo, el devanado de campo y el par mecánico.

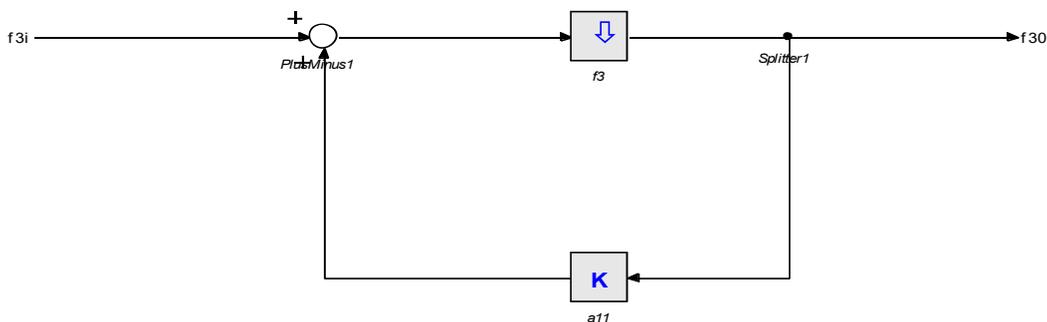


Figura 4.15 Estructura interna del bloque dinámico.

En la tabla 4.3 se muestra los valores que se tomaron para la simulación del generador síncrono.

Variabales	Valores	Variabales	Valores
r_d	0.1	L_1	4.0994
L_d	1.7	L_2	-3.8509
M_{dF}	1.55	L_3	-3.8509
L_q	1.64	L_4	4.2236
w	1	λ_q	1
T_m	100	λ_d	1
r_q	1	v_F	30
r_F	1	v_q	60
T_J	2.37	v_d	60
L_F	1.65	R_{LC}	5
R_{LA}	5	R_{LB}	5

Tabla 4.3 Valores del generador síncrono.

En la figura 4.16 se muestra el esquema del generador con la transformada de park conectado al bus infinito de esta manera conectándose al bus se aplica la resistencia de la línea en forma de carga en este caso el generador no se encuentra en vacío y de esta manera trabajé con carga.

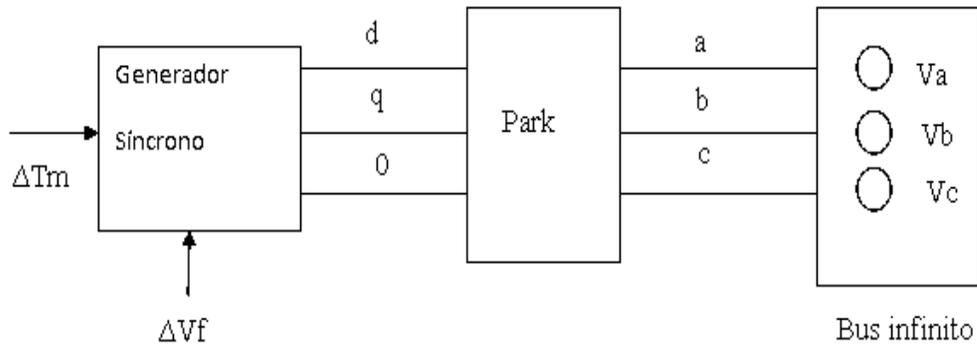


Figura 4.16 Esquema de conexión al bus infinito.

De esta manera el diagrama del generador se presenta con la transformada de park y la conexión al bus infinito. Donde la descripción de los componentes de la central hidroeléctrica y el análisis se presentará de la siguiente manera, primero en la secuencia $dq0$ para presentar de manera más clara el comportamiento de la central por último se tendrá en la secuencia a, b, c para conectarse al bus.

A continuación se muestra en la figura 4.17, el esquema de simulación del generador síncrono representado en diagramas de bloques.

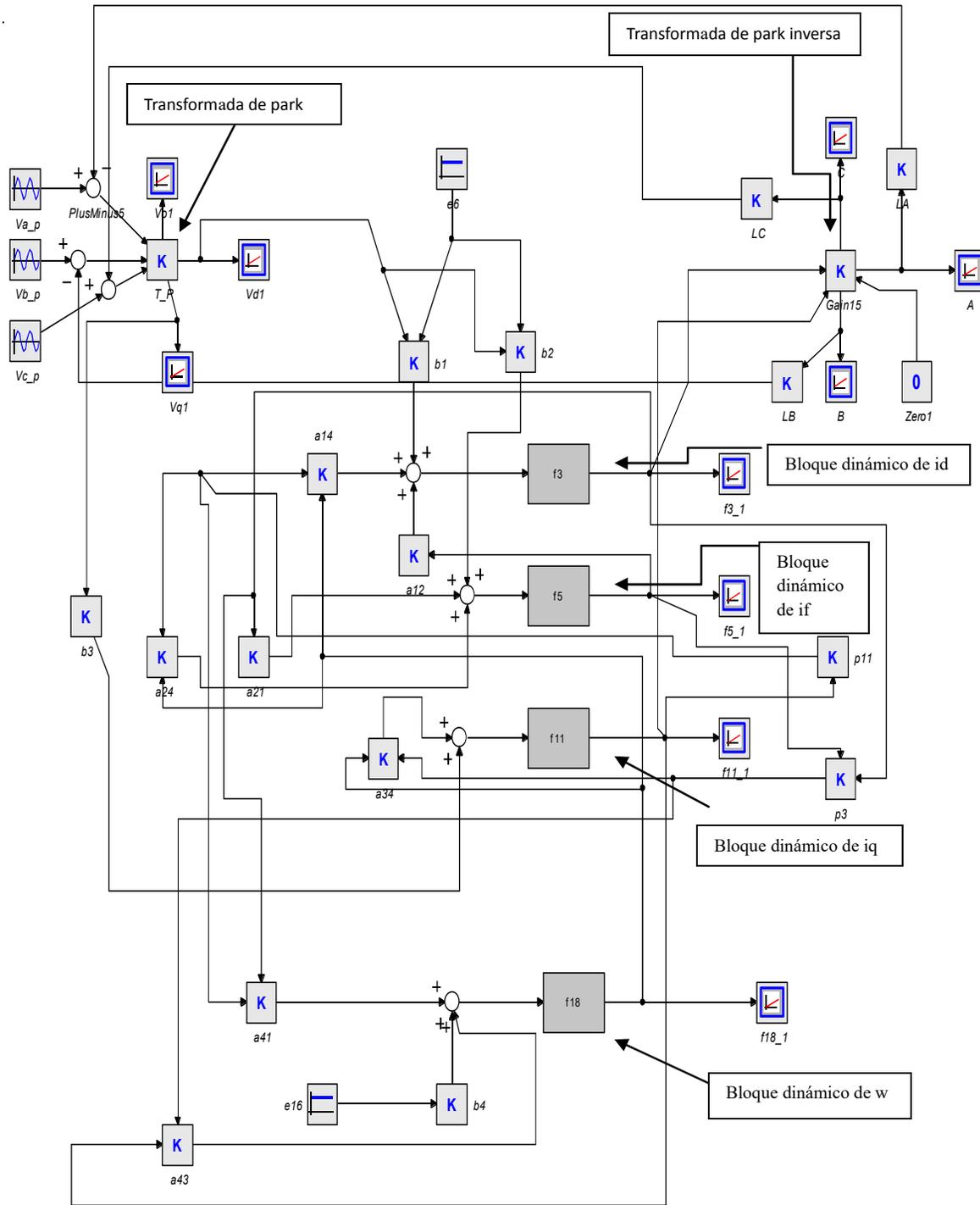


Figura 4.17 Diagrama del generador síncrono.

En la figura 4.17 del generador, podemos observar al principio las señales de entrada senoidales de voltaje donde se le aplica la transformada de park teniendo ahora una secuencia $dq0$ las cuales están representadas como f_3 que es el eje directo y f_{11} representa el eje de cuadratura, de igual manera se encuentran la velocidad angular del rotor expresada en $f_{18} = \omega$, además el devanado de campo está constituido en el bloque de $f_5 = i_F$. De manera siguiente se observan los puntos suma donde en este bloque representa las variables f_3, f_{11}, f_{18} y f_5 que son donde se suman o restan las variables del generador. Uno de los bloques importantes es la ganancia b4 está es alimentada con una fuente constante e16 la cuál hasta el momento representa el par mecánico aplicado al generador síncrono, en el bloque dinámico es un subconjunto donde en la programación interna de este se encuentran las relaciones propias del par mecánico, del eje de cuadratura, del eje directo y el devanado de campo, continuando se observa un gran número de ganancias las cuales representan las diferentes variables que involucra el generador síncrono. Por último, representan los bloques de la transformada inversa y de las resistencias de la línea conectada al bus infinito para que el generador trabaje con carga y la respuesta de estado estable sea lo más rápida posible.

En la figura 4.18 se muestra el diagrama de flujo de donde $f_{11} = i_q$ representa el eje de cuadratura.

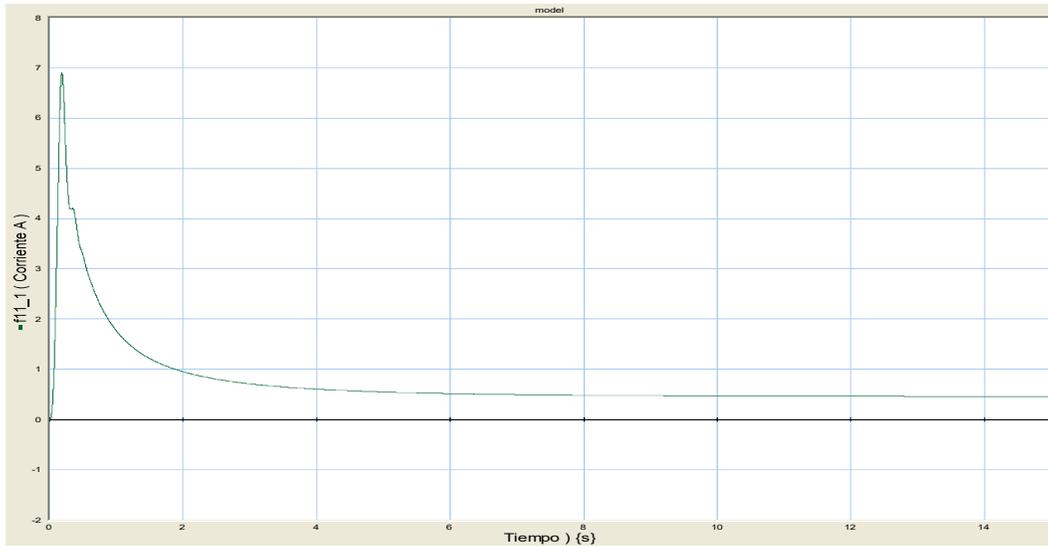


Figura 4.18 Comportamiento de la corriente del eje de cuadratura.

En la figura 4.19 se muestra la corriente $f_3 = i_d$ que representa el eje directo.

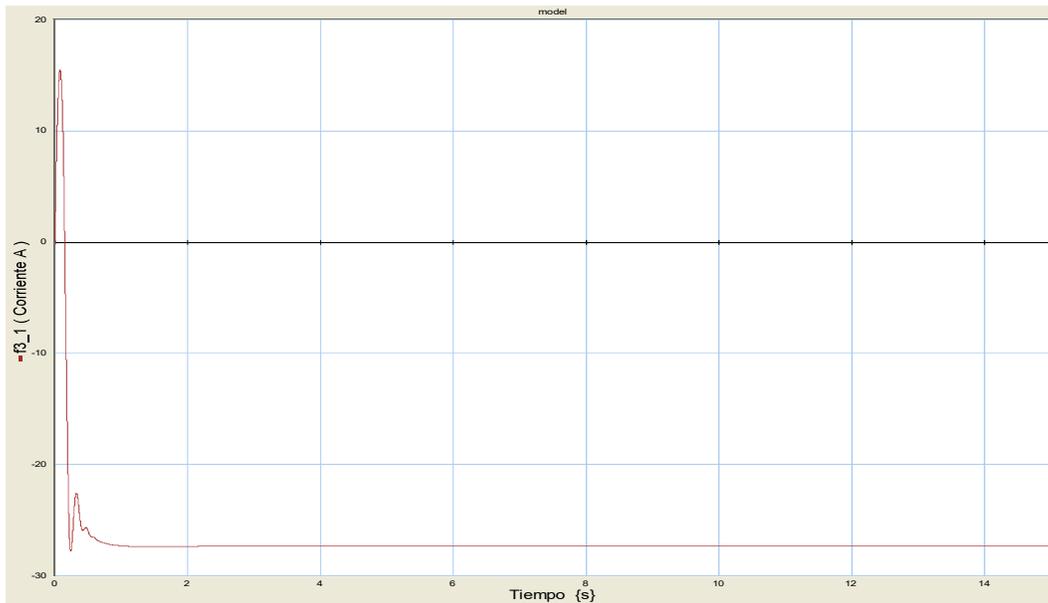


Figura 4.19 Comportamiento de la corriente del eje directo.

En la figura 4.20 se muestra la corriente en el devanado de campo, donde $f_5 = i_F$.

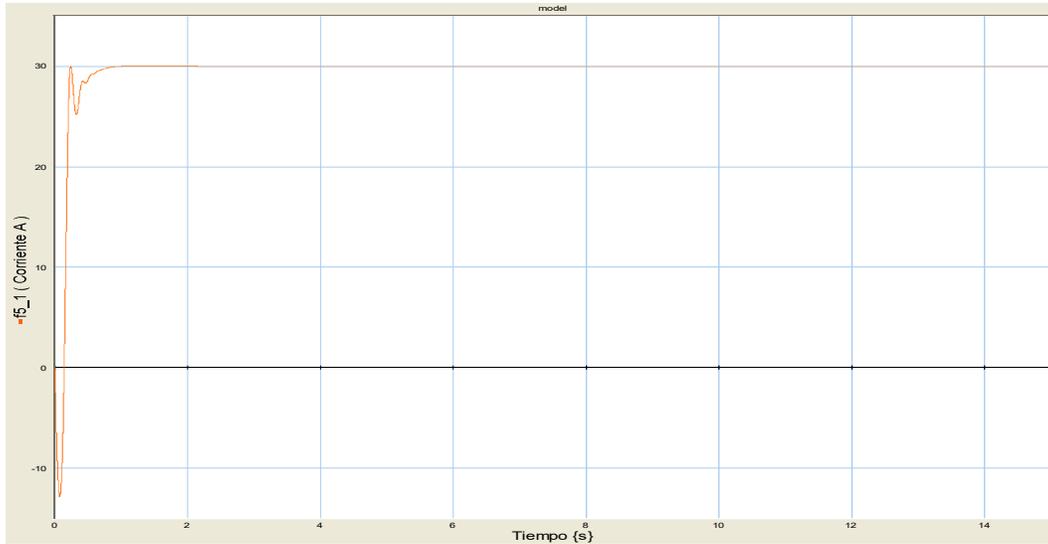


Figura4.20Gráfica del devanado de campo.

En la figura 4.21 se muestra la velocidad angular del rotor, donde $f_{18} = \omega$.

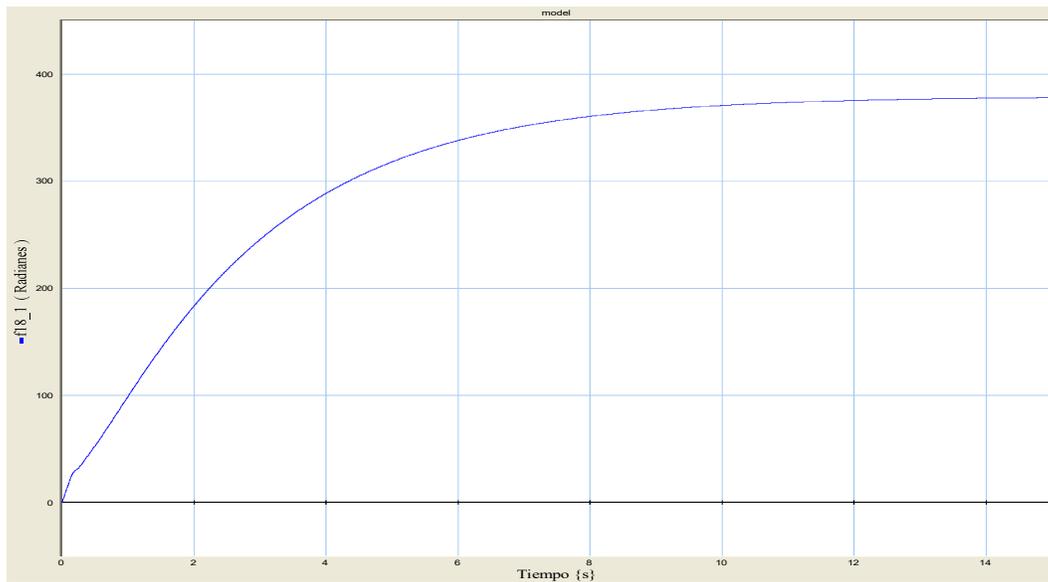


Figura4.21Gráfica del comportamiento de velocidad.

En la figura 4.22 se muestra los voltajes de los ejes de cuadratura y eje directo.

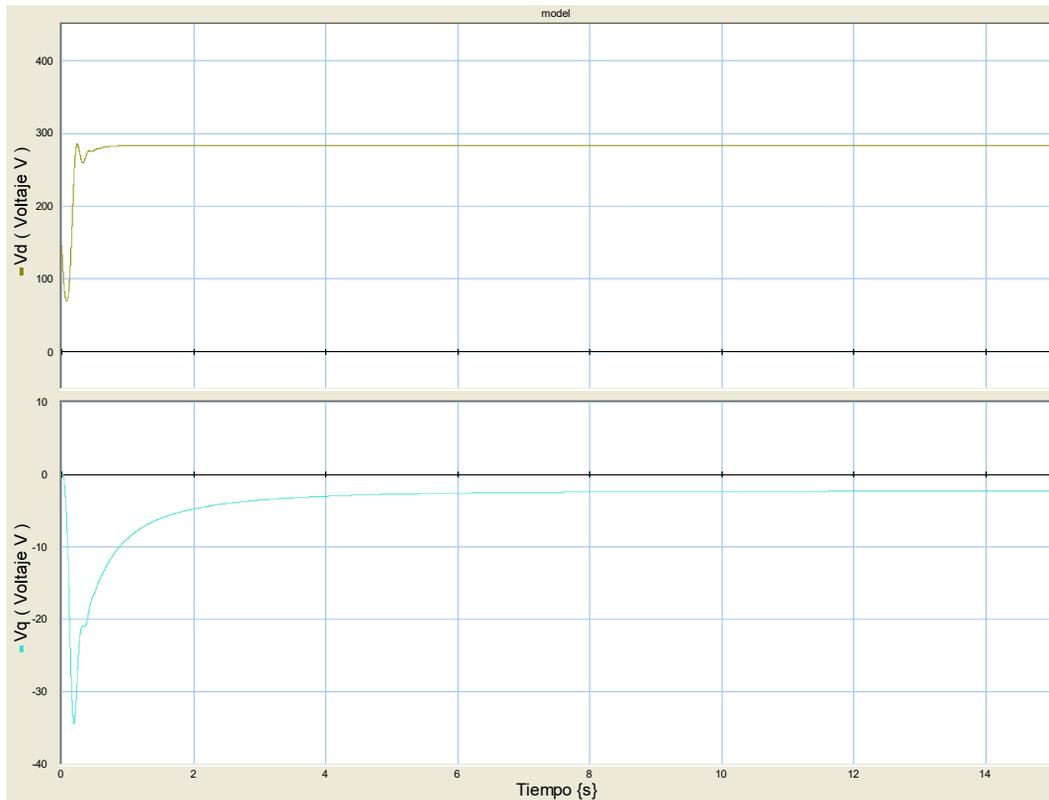


Figura 4.22 Voltajes de los ejes cuadratura y directo.

4.5 Sistema Mecánico acoplado al generador síncrono.

En la figura 4.23 se muestra una manera más completa de la central hidroeléctrica representada en diagramas de bloques donde se sustituyó la fuente constante e16, la cual proporcionaba el par mecánico. Posteriormente, se conecta el sistema hidráulico-mecánico el cual tiene la función de proporcionar el par mecánico al generador síncrono.

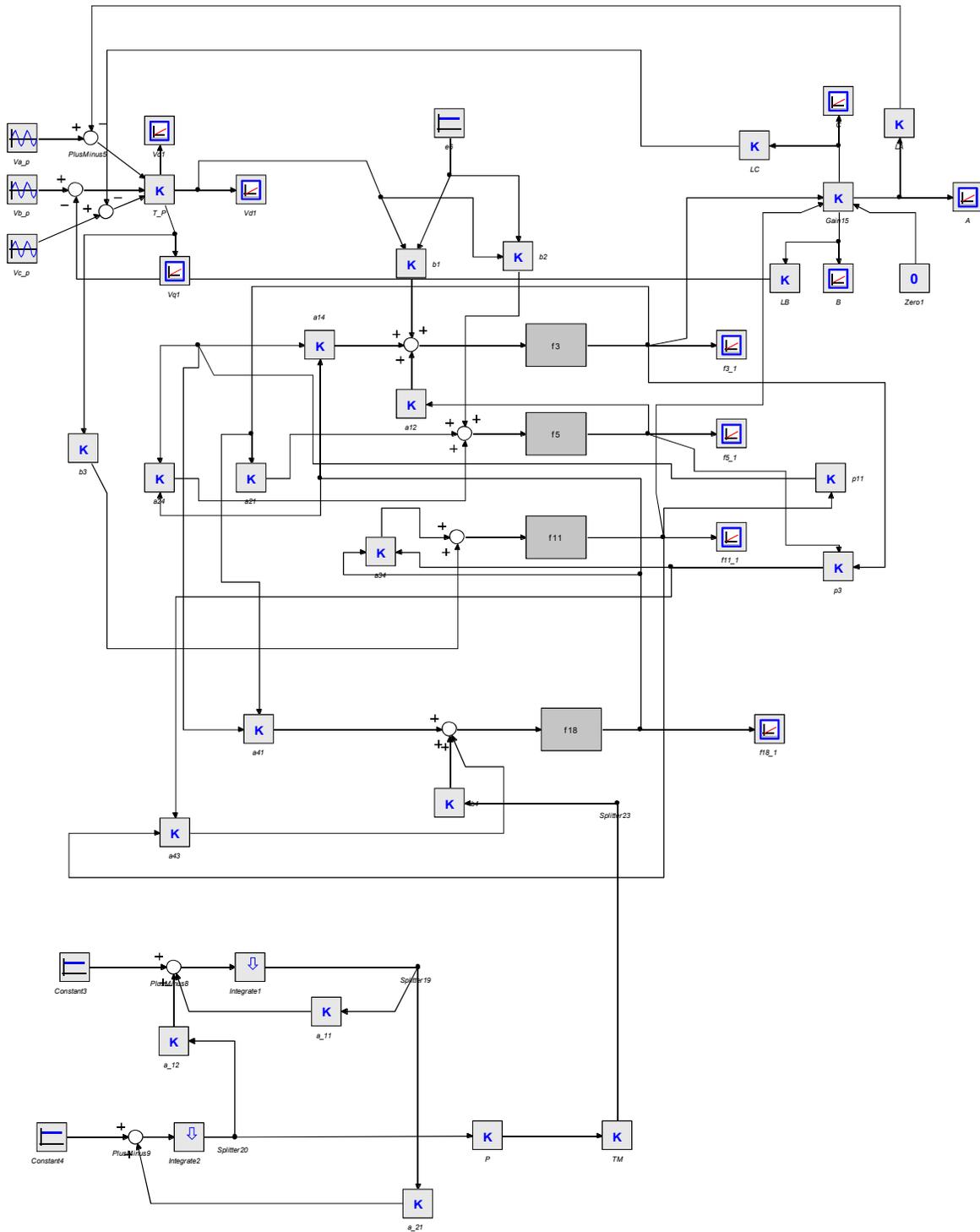


Figura 4.23 Central hidroeléctrica con sistema mecánico e hidráulico.

En la figura 4.24 se muestra la simulación de las variables de la central las cuales son: velocidad angular del rotor donde $f_{18} = \omega$, el devanado de campo donde $f_5 = i_F$, la corriente del eje directo $f_3 = i_d$ y $f_{11} = i_q$ que representa el eje de cuadratura.

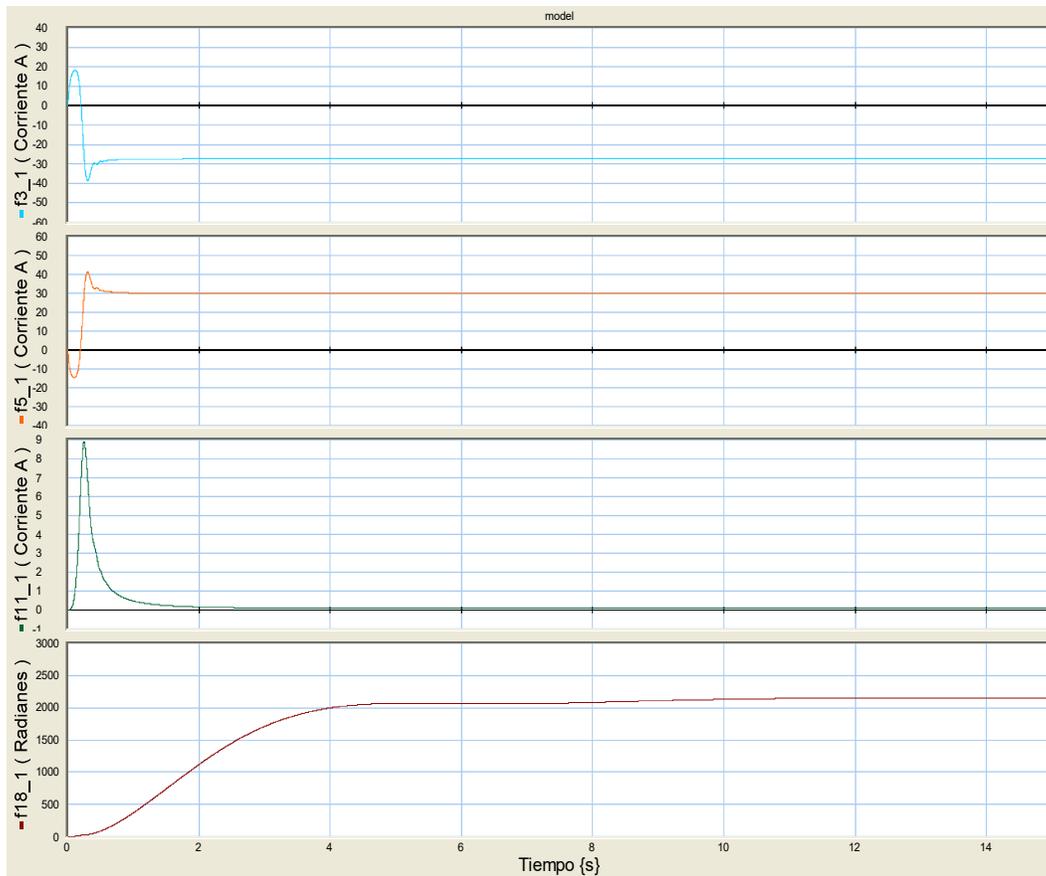


Figura 4.24 Simulación de la Central Hidroeléctrica.

En la figura 4.25 se muestran los voltajes de los ejes directo y el de cuadratura después de acoplarle el sistema mecánico.

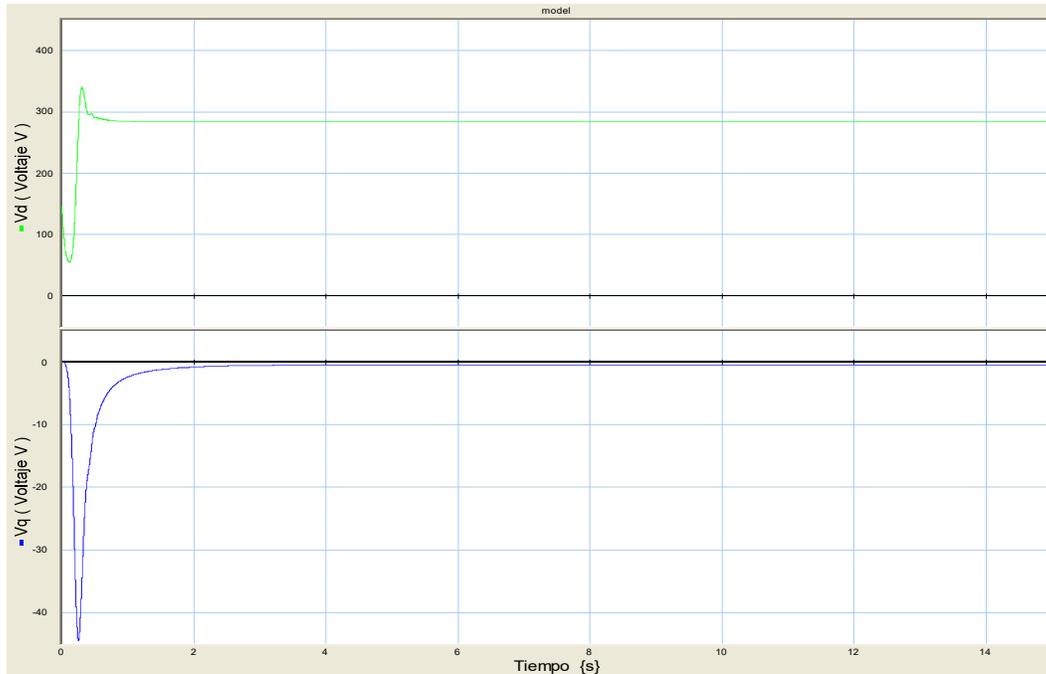


Figura 4.25 Voltajes de cuadratura y directo incorporando el sistema mecánico.

En la figura 4.23 se muestra la representación de los tres sistemas que conforman la central hidroeléctrica, sistema hidráulico, sistema mecánico y el generador síncrono trifásico completo donde se tiene a la salida una secuencia a, b, c donde en la figura 4.23 se representó el esquema de conexión para poder conectarse a un bus infinito.

4.6 Simulación de la Central Hidroeléctrica en secuencia a, b, c

Finalmente, en esta sección se presenta la simulación de la central hidroeléctrica en 20-Sim teniendo como señales de salida las corrientes i_a, i_b e i_c .

En la gráfica de la figura 4.26 se muestra la corriente de salida de la fase a de la

central hidroeléctrica.

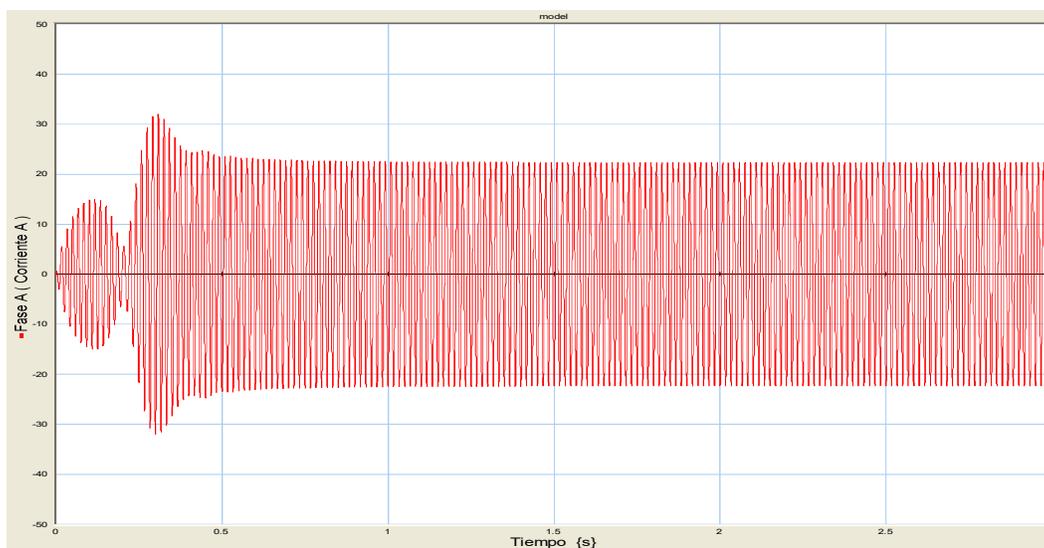


Figura 4.26 Gráfica de la fase a.

La gráfica de la figura 4.27 se muestra la corriente de salida de la fase b.

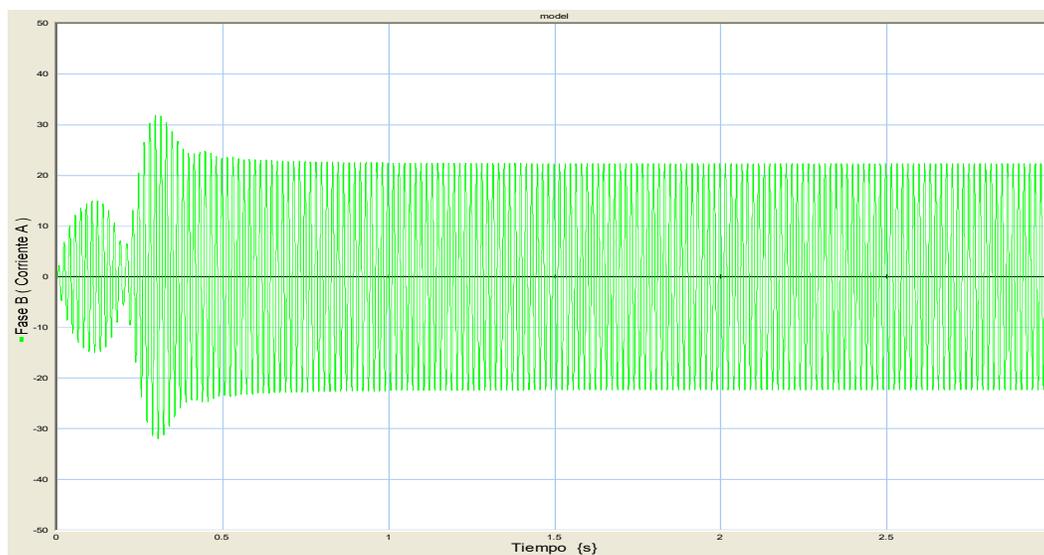


Figura 4.27 Gráfica de la fase b.

En la figura 4.28 se muestra la última de las tres fases de corriente la fase c

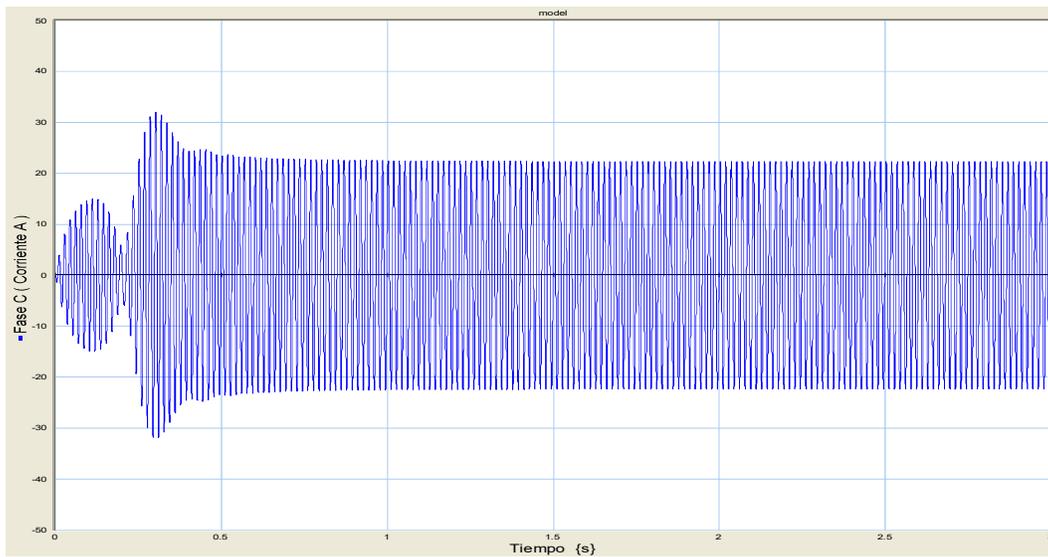


Figura 4.28 Gráfica de la fase c.

A continuación en la figura 4.29 se muestra la mismas gráficas pero con un intervalo de tiempo de respuesta menor al de las gráficas anteriores donde se muestra de una manera más clara el comportamiento de cada una de ellas.

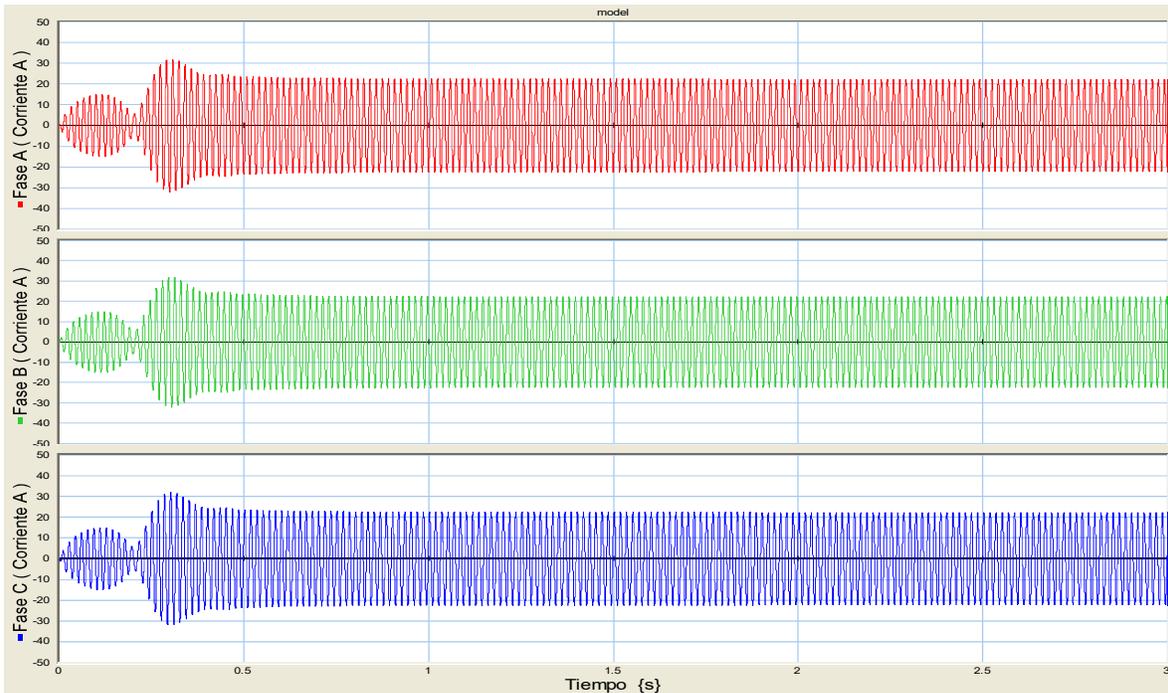


Figura 4.29 Gráfica de las variables de corriente a, b, c.

En la figura 4.30 se muestra las tres fases juntas para observar el desfase que hay entre ellas.

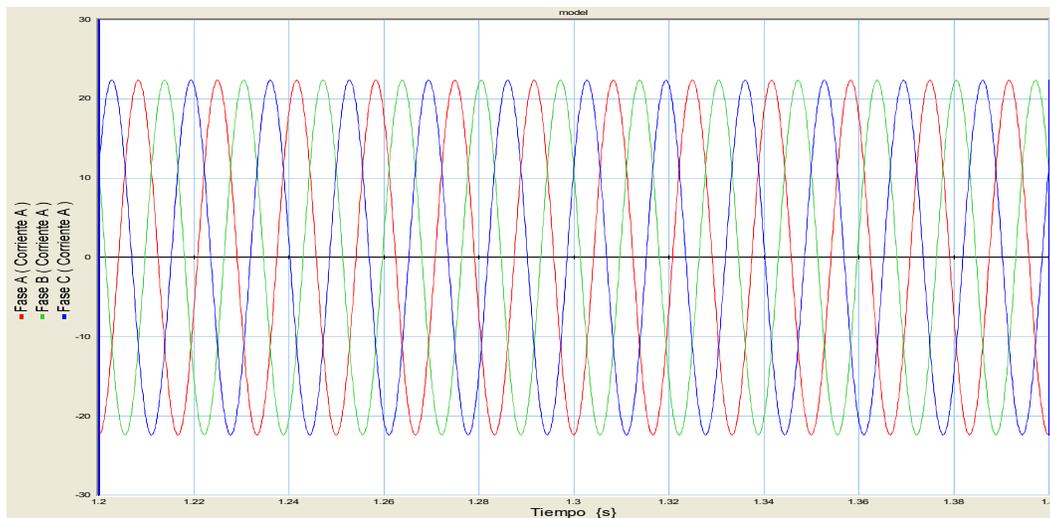


Figura 4.30 Desfase de las fases

En la figura 4.31 se muestra las señales de corriente donde se aumenta el caudal para obtener una mayor corriente en este caso en el momento que el sistema de mande más corriente para cubrir las horas pico en ese momento es cuando se obtendrá una mayor salida en el generador mientras no se demande una mayor carga a pesar de aumentar el caudal no generara más corriente hasta el que el sistema lo requiera.

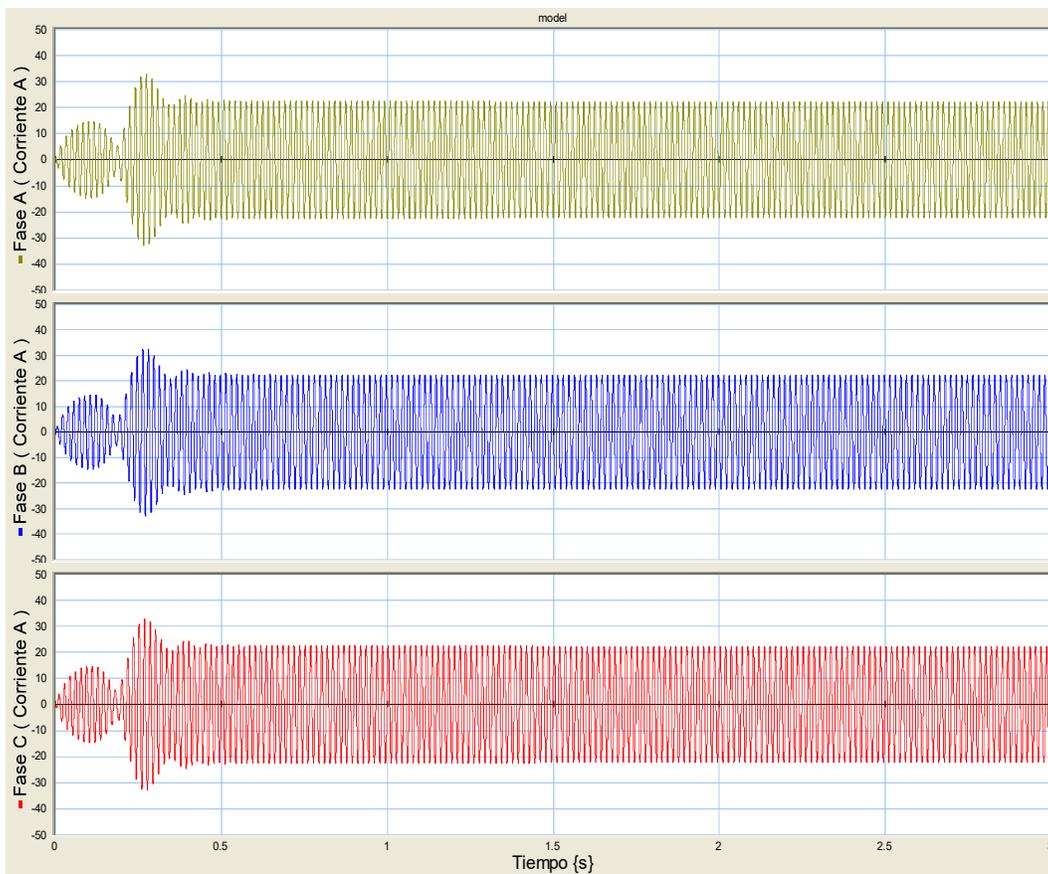


Figura 4.31 Señales de corriente $i_a, i_b,$ e i_c aumentando el caudal.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

En la presente tesis se describe la importancia de las centrales hidroeléctricas como una fuente limpia de generación de energía eléctrica.

La representación de la central hidroeléctrica se dividió en subsistemas para obtener el modelo físico deseado de esta manera concluimos que es más fácil el análisis de dichos sistemas teniendo por separado. En el análisis del generador síncrono se utilizó la transformada de park donde el análisis se realizó en secuencia $dq0$ para simularlas adecuadamente.

Por otra parte se concluye que al generador síncrono se le aplicó la carga de la línea para que trabajara en forma estable y no estar en vacío.

Se desarrolló el modelo de la central hidroeléctrica en variables de estado donde se representó en diagrama de bloques en el software 20-Sim que permite representar la simulación de sistemas dinámicos donde se observa de una manera más eficiente el comportamiento de la central hidroeléctrica.

5.2 Recomendaciones

La presente tesis describe el modelo y simulación de la central hidroeléctrica basando su análisis en variables de estado. Se recomienda representar la turbina hidráulica en variables de estado considerando la no linealidad.

Para el análisis de la turbina se recomienda utilizar el método de Bond Graph para determinar el análisis de la turbina.

Bibliografía

- 1) Notas proporcionadas por Dr. Gilberto González Avalos

- 2) Máquinas Eléctricas
Stephen J. Chanman

- 3) Centrales hidroeléctricas II Turbinas Hidráulicas
Editorial Paraninfo

- 4) Ingeniería en Control Moderna.
Katsuhiko Ogata.

- 5) Centrales Hidroeléctricas.
Zoppetti, G.

- 6) Turbomáquinas Hidráulicas.
Mataix, C.

- 7) <http://es.libros.redsauce.net>

- 8) http://www.ing.una.py/DIREC_PPAL/ACADEMICO/APOYO/Maquinas_Hidraulicas/PDF/MAQ%20HIDRAULICAS%20TURBINAS%20FRANCIS.pdf