

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniero Industrial

G.E. Van der Kerchove -

Autor: Francisco Menacho Valle

DNI: 44050939M

Tutor: José Luis Rodríguez Álvarez

Dept. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014



Departamento de
Ingeniería Gráfica

INDICE

1. INTRODUCCION.....	4
2. DEFINICIÓN DE MÁQUINA DE VAPOR	5
3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA MÁQUINA DE VAPOR	7
3.1 Introducción.....	7
3.2 Primeras tentativas.....	8
3.3 Su evolución	10
3.4 Máquina de expansión	15
4. TRANSPORTE A VAPOR , EVOLUCIÓN DEL AUTOMÓVIL	18
5. TRANSPORTE A VAPOR ACUÁTICO	23
5.1 La propulsión a vapor (1787).....	23
5.2 Primera prueba española de propulsión a vapor (1543)	25
5.3 Primer vapor construido en España (1817).....	26
6. TRANSPORTE A VAPOR FÉRREO EN SEVILLA, EL “PIOJO VERDE”	29
7. LA MÁQUINA DE VAPOR DE VAN DER KERCHOVE	32
7.1 HISTORIA.....	32
7.2 FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE VAPOR.....	33
7.2.1 Ciclo de vapor abierto	33
7.3 FUNDAMENTOS DEL GENERADOR SÍNCRONO	37
7.3.1 Construcción del generador síncrono.....	37
7.3.2 Velocidad de rotación de un generador síncrono.....	52
7.3.3 Circuito equivalente de un generador síncrono	54
7.3.4 Diagrama Fasorial de un generador sincrónico.....	64
7.3.5 Potencia y Par en los generadores sincrónicos.....	66
7.3.6 Voltaje, velocidad y frecuencia nominales	68

7.3.7 Valores nominales de potencia aparente.....	69
7.3.8 Resumen	71
7.4 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR DE LA MÁQUINA DE VAN DER KERCHOVE.....	73
7.5 DESCRIPCIÓN DE LA ANIMACIÓN DE MOVIMIENTO DE LA MÁQUINA DE VAN DER KERCHOVE	80
8. BIBLIOGRAFÍA	82
9. LISTA DE PLANOS	83

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto final de carrera se centra en la descripción del funcionamiento de la máquina de Van Der Kerchove, expuesta en la Escuela de Ingenieros de Sevilla explicando su funcionamiento como máquina de vapor y generador de energía eléctrica.

También se han modificado y realizado modelos cad y planos de cada una de las piezas que lo componen, así como una animación donde se puede observar el montaje de la máquina y su funcionamiento.

Además, se hará un repaso de la evolución de la tecnología del uso del vapor, con una especial atención a su uso en aplicaciones en la Ciudad de Sevilla.

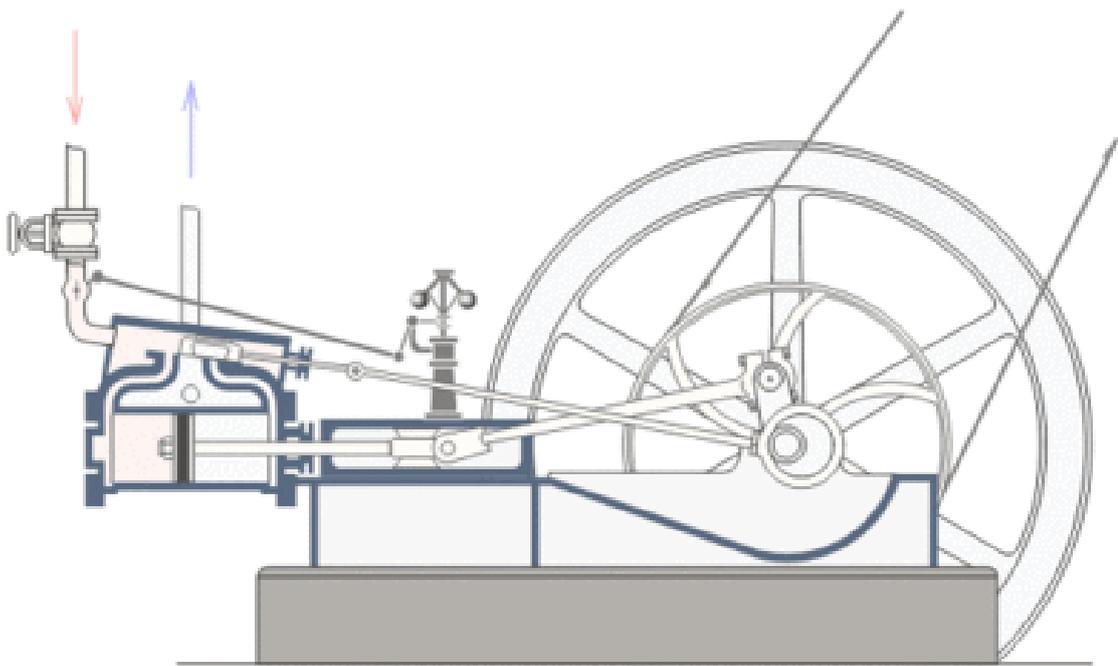
2. DEFINICIÓN DE MÁQUINA DE VAPOR

Una máquina de vapor es un motor de combustión externa que transforma la energía térmica de una cantidad de agua en energía mecánica. En esencia, el ciclo de trabajo se realiza en dos etapas:

1. Se genera vapor de agua en una caldera cerrada por calentamiento, lo cual produce la expansión del volumen de un cilindro empujando un pistón. Mediante un mecanismo de biela - manivela, el movimiento lineal alternativo del pistón del cilindro se transforma en un movimiento de rotación que acciona, por ejemplo, las ruedas de una locomotora o el rotor de un generador eléctrico. Una vez alcanzado el final de carrera el émbolo retorna a su posición inicial y expulsa el vapor de agua utilizando la energía cinética de un volante de inercia.
2. El vapor a presión se controla mediante una serie de válvulas de entrada y salida que regulan la renovación de la carga; es decir, los flujos del vapor hacia y desde el cilindro.

El motor o máquina de vapor se utilizó extensamente durante la Revolución Industrial, en cuyo desarrollo tuvo un papel relevante para mover máquinas y aparatos tan diversos como bombas,

locomotoras, motores marinos, etc. Las modernas máquinas de vapor utilizadas en la generación de energía eléctrica no son ya de émbolo o desplazamiento positivo como las descritas, sino que son turbomáquinas; es decir, son atravesadas por un flujo continuo de vapor y reciben la denominación genérica de turbinas de vapor. En la actualidad la máquina de vapor alternativa es un motor muy poco usado salvo para servicios auxiliares, ya que se ha visto desplazado especialmente por el motor eléctrico en la maquinaria industrial y por el motor de combustión interna en el transporte.



Máquina de vapor

3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA MÁQUINA DE VAPOR

3.1 Introducción

En la máquina de vapor se basa la Primera Revolución Industrial que, desde finales del siglo XVIII en Inglaterra y hasta casi mediados del siglo XIX, aceleró portentosamente el desarrollo económico de muchos de los principales países de la Europa Occidental y de los Estados Unidos. La llegada de la Revolución Industrial no se limitó a las manufacturas textiles, a la siderurgia o a la industria química, aunque en estas categorías hubiera avances prodigiosos. Dado el aumento de la producción logrado con dichos avances, era menester una red de comunicaciones todo lo buena que fuese posible, para lo cual debía optimizarse de algún modo el empleo de energía en los medios de locomoción, esto es, incrementarla y aprovecharla en la mayor medida posible.

La máquina de vapor resolvió los problemas de la limitación de las fuerzas animal y humana y de la indisponibilidad de la energía hidráulica en la mayoría de los escenarios y sentó las bases para la industrialización. Luego de unos pocos años, se convirtió en la fuerza impulsora del trabajo en fábricas y minas.

Muchos han sido los autores que han intentado determinar la fecha de la invención de la máquina de vapor atribuyéndola a tal o

cual inventor; intento que había sido en vano, ya que la historia de su desarrollo estaba plagada de nombres propios. Desde la recopilación de Herón hasta la sofisticada máquina de James Watt, son multitud las mejoras que en Inglaterra y especialmente en el contexto de una incipiente Revolución Industrial en los siglos XVII y XVIII condujeron sin solución de continuidad desde los rudimentarios primeros aparatos sin aplicación práctica a la invención del motor universal que llegó a implantarse en todas las industrias y a utilizarse en el transporte, desplazando los tradicionales motores, como el animal de tiro, el molino o la propia fuerza del hombre. Jerónimo de Ayanz y Beaumont, militar, pintor, cosmógrafo y músico, pero, sobre todo, inventor español registró en 1606 la primera patente de una máquina de vapor moderna, por lo que se le puede atribuir la invención de la máquina de vapor. El hecho de que el conocimiento de esta patente sea bastante reciente hace que este dato lo desconozca la gran mayoría de la gente.

3.2 Primeras tentativas

Entre las reliquias de la civilización egipcia encontramos el primer registro conocido de una máquina de vapor en el manuscrito de Herón de Alejandría titulado *Spiritualia seu Pneumatica*. Los aparatos allí descritos no se sabe con certeza si fueron obra del ingenio de Herón, porque él mismo dice en su obra que su intención

no es otra que recopilar las máquinas que ya eran conocidas y añadir las inventadas por él. Nada en el texto indica quién pudo ser el artífice de los dispositivos descritos y se sospecha que muchos puedan ser, en realidad, obra de Ctesibio, de quien Herón fue pupilo.

Según cuenta Herón en su manuscrito, ideó esta primera máquina mediante experimentos con vapor de agua que le llevaría a descubrir de forma arcaica la ley de acción y reacción. La llamada Aeópila de Herón (o también eópila) consiste en un dispositivo constituido por una cámara de aire que se autoimpulsa despidiendo vapor por uno o más orificios al recibir el agua calentada en otra cámara, y unida a la anterior mediante tubos por donde pasa el vapor, aunque también puede ser calentada en la misma cámara desde donde se expulsa el vapor. Las máquinas térmicas en general (entre las cuales la Aelópila es probablemente la de primera invención) transforman energía térmica en energía mecánica. Todas funcionan tomando calor de una fuente caliente y entregando a una fuente fría el que no se ha transformado en trabajo.



3.3 Su evolución

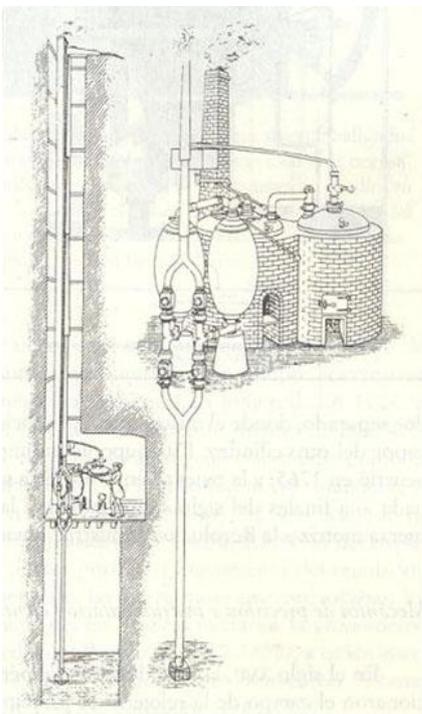
En 1825 el superintendente del Archivo de Simancas descubrió una publicación de 1695 que relataba que en 1543 Blasco de Garay, oficial de la marina española en el reinado de Carlos I, intentó impulsar un barco con ruedas de palas movidas por una máquina de vapor. Del supuesto motor no se tienen datos, pero si fuera cierto, el intento hubiera sido la primera vez que una máquina de vapor se utilizara con un propósito práctico.

En 1601, Giovanni Battista della Porta describe un aparato para elevar el agua por medio del fuego, similar al descrito por Herón pero empleando vapor de agua para impulsar el líquido, y en 1615 Salomón de Caus describe un aparato similar para hacer funcionar una fuente. Pero la primera patente de la que se tiene constancia documental es de Jerónimo de Ayanz y Beaumont, que en 1606 registra una máquina de vapor utilizada con éxito para el desagüe de las minas de plata de Guadalcanal.

El común denominador de todos estos intentos es un tubo sumergido hasta prácticamente el fondo del recipiente de agua por donde ésta asciende al incrementarse la presión en la superficie libre del líquido, trabajos directamente relacionados con los estudios teóricos de Galileo, Torricelli, Pascal y Von Guericke sobre la presión atmosférica que condujeron a mediados del siglo XVII al abandono de la teoría del horror vacui.

La primera máquina fue inventada por Eduard Somerset, segundo marqués de Worcester, en 1663, y por su descripción es muy similar, conceptualmente, a la fuente de Caus, si bien de la máquina de Somerset se construyó un modelo en Vauxhall (cerca de Londres) en el castillo Rawlan en torno a 1665, con el propósito de elevar el agua a los pisos superiores de la construcción. Con las especificaciones técnicas escritas y las huellas dejadas en los muros del castillo, Dircks —biógrafo de Somerset— pudo reconstruir la máquina construida en Vauxhall.

Sin embargo, Somerset no pudo atraer los capitales necesarios para producir y vender sus máquinas y murió en la pobreza. Este es, posiblemente, el hecho que hace que se haya atribuido a Thomas



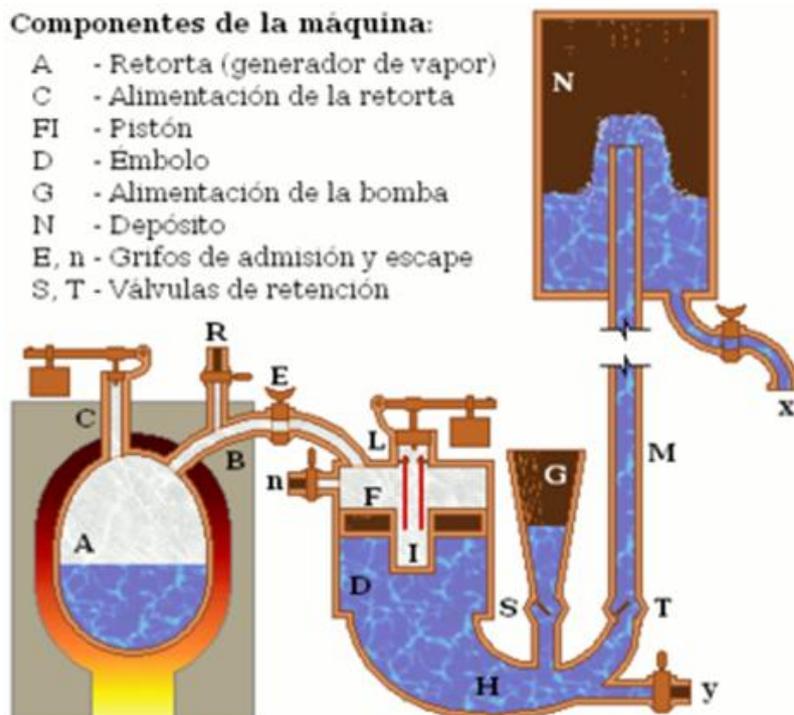
Motor de Savery

Savery la invención de la máquina de Somerset, sobre la que obtuvo una patente en 1698. Entre ambos hay que mencionar a Samuel Morland, maestro mecánico en la corte de Carlos II de Inglaterra, y residente en Vauxhall, que construyó y patentó máquinas diversas, entre ellas versiones mejoradas de la máquina de Somerset, sugiriendo Hutton que, en realidad, Savery pudo tener un mayor conocimiento de los trabajos de Morland que los del propio Somerset.

El motor de Savery fue utilizado en minería como bomba para drenar el agua de los túneles, pero a pesar de todo, esta máquina se introdujo en las minas inglesas de forma muy limitada por el riesgo de explosión debido a un incremento incontrolado de la presión en la máquina. Desaguliers relata que un trabajador ignorante de la naturaleza de la máquina, a la que él había añadido una válvula de seguridad inventada años antes por Denis Papin, «...colgó el peso en el extremo de la romana para obtener más vapor y trabajar más deprisa y añadió además un hierro muy pesado con consecuencias fatales, el vapor no fue capaz de levantar semejante contrapeso y acumulándose en el interior de la caldera provocó una gran explosión que acabó con la vida del pobre hombre». Probablemente sea éste el primer accidente laboral con una máquina de vapor del que se tiene constancia.

A diferencia de los dispositivos anteriores, en los que el vapor actúa sobre la propia superficie libre del agua para impulsarla, Huygens diseña en 1680 un aparato de pistón en el que el fluido es el aire caliente producido en una explosión que al enfriarse y contraerse arrastra el émbolo, elevando un peso.

Años más tarde Papin (1690) sustituye el aire por vapor de agua e inventa uno de los primeros motores a pistón. El sencillo dispositivo consistía en un cilindro simple, que simultáneamente servía como caldera.



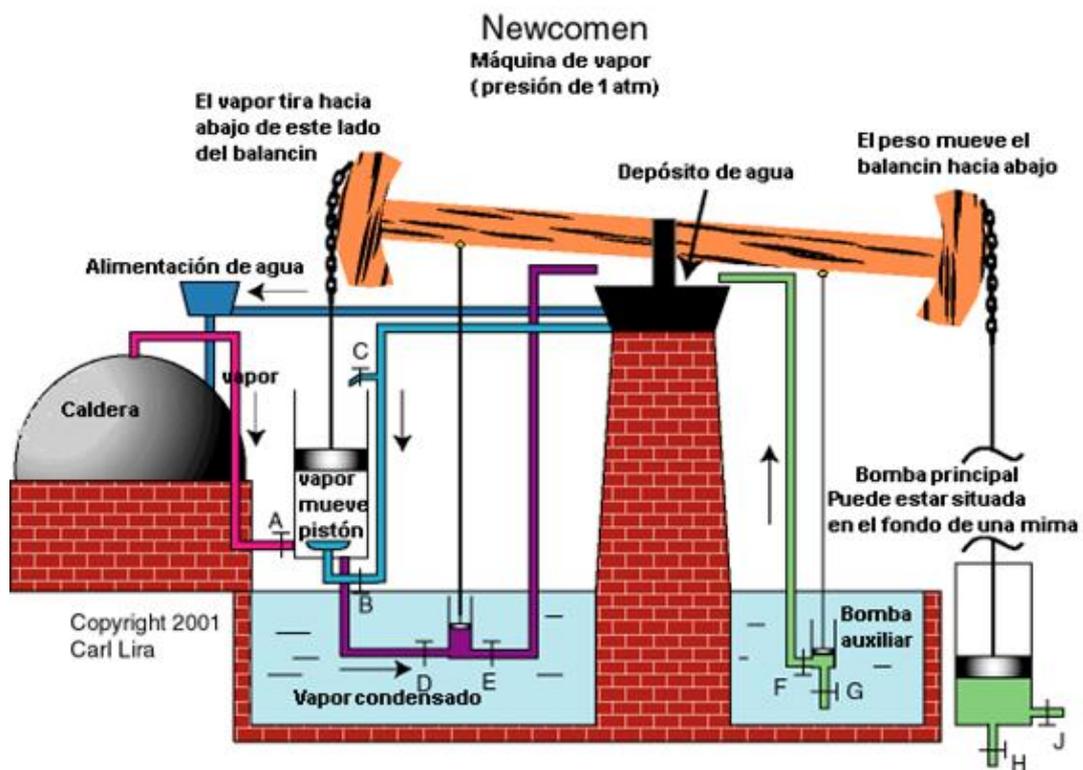
Máquina de Papin

En una modificación posterior (1695) Papin diseña un horno y generador de vapor de gran eficiencia, con el que logra importantes ahorros de combustible y hasta cuatro golpes del pistón por minuto.

En 1705, el inglés Thomas Newcomen desarrolló los primeros motores de vapor que funcionaban con caldera, cilindro y pistón. En estos motores de vara, una larga barra oscilaba de arriba hacia abajo, transfiriendo la energía a un pistón que se movía dentro del cilindro. Cuando el pistón se elevaba, el vapor entraba al cilindro, se condensaba y la presión del aire empujaba al pistón nuevamente

hacia abajo. Pero su rendimiento era muy pobre, tan solo el 0.5% de la energía del combustible utilizado.

Aún con su elevado consumo de combustible y el elevado desgaste de sus componentes, fue considerable su utilización, especialmente, en la creciente industria textil británica.



Máquina de Newcomen

3.4 Máquina de expansión

Auspiciado por Joseph Black, ocupado en las investigaciones que le conducirían al descubrimiento del calor latente, James Watt se propuso mejorar la máquina de Newcomen, descubriendo en el curso de sus experimentos que el vapor era una reserva de calor mucho más vasta que el agua y comprendiendo que era necesario limitar todas las pérdidas de calor que se producían en la artesanal máquina de Newcomen para disminuir el consumo de combustible, principal inconveniente de estas máquinas. Analizando el problema identificó las pérdidas debidas al propio cilindro, a la práctica de enfriar el vapor para lograr el vacío necesario para mover la máquina y a la presión residual del vapor. En sus experimentos posteriores, verdaderos trabajos científicos, llegó a la conclusión de que el cilindro debía mantenerse a la misma temperatura.

Según sus palabras, mientras daba un paseo un espléndido sábado por la tarde y meditaba sobre la máquina, una idea le vino a la cabeza: como el vapor es un cuerpo elástico se precipitará en el vacío, y, si se comunicara el cilindro con un depósito exhausto, se precipitaría en su interior donde podría condensarse sin enfriar el cilindro. Sin embargo, el desarrollo y perfeccionamiento del condensador separado dejó a Watt en la ruina y en 1765 se vio obligado a buscar empleo y abandonar su trabajo hasta que, en 1767, John Roebuck accedió a financiar sus experimentos y la

explotación comercial de la máquina a cambio de las dos terceras partes de los beneficios de la patente que se obtuviera. En 1768 Watt construyó un modelo que operaba de manera satisfactoria, aún imperfecta, y se presentó el año siguiente la solicitud de la patente. Tras diferentes avatares económicos, Roebuck se desprendió de su parte del negocio en favor de Matthew Boulton y juntos Boulton & Watt finalmente llevarían a la práctica la invención de Watt y otros perfeccionamientos.

La primera máquina se construyó en Kinneil, cerca de Boroughstoness en 1774. A partir de entonces la historia de la máquina de vapor será la de la firma Boulton & Watt, y casi todas las mejoras que se introduzcan en ella serán obra del propio Watt; entre otras, el paralelogramo de Watt, la expansión del vapor, la máquina de doble efecto (en la que el vapor actúa alternativamente sobre ambas caras del pistón), etc.



Máquina de vapor de Watt, procedente de la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre, expuesta en el vestíbulo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

A comienzos del Siglo XIX, el ingeniero en minería inglés Richard Trevithick, y el inventor norteamericano Oliver Evans, construyeron exitosamente el primer motor de vapor de alta presión. Trevithick utilizó este modelo para propulsar la primera locomotora de vapor del mundo. Tanto Trevithick como Evans desarrollaron también carruajes con motor para carretera.

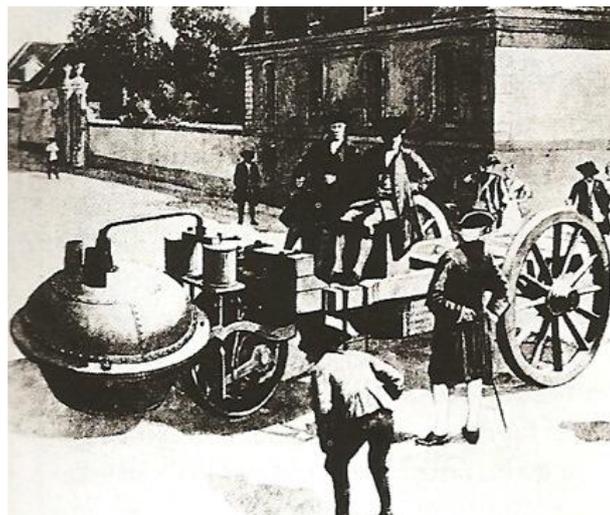
Por esta época el ingeniero e inventor británico Arthur Woolf desarrolló las primeras máquinas de vapor compuestas. En estas máquinas se utiliza vapor a alta presión en un cilindro y cuando se ha expandido y perdido presión es conducido a otro cilindro donde

se expande aún más. Los primeros motores de Woolf eran del tipo de dos fases, pero algunos modelos posteriores de motores compuestos contaban con tres o cuatro fases de expansión. La ventaja de utilizar en combinación dos o tres cilindros es que se pierde menos energía al calentar las paredes de los cilindros, lo que hace que la máquina sea más eficiente.

4. TRANSPORTE A VAPOR, EVOLUCION DEL AUTOMOVIL

El primer coche conocido utilizaba un motor a vapor y, en 1900, casi el 50% de los automóviles tenían este tipo de motor. La firma alemana Doble construyó automóviles de vapor prácticamente hasta la Segunda Guerra Mundial, y los primeros automóviles que consiguieron superar los 120, 200 y 300 km/h llevaban motores a vapor.

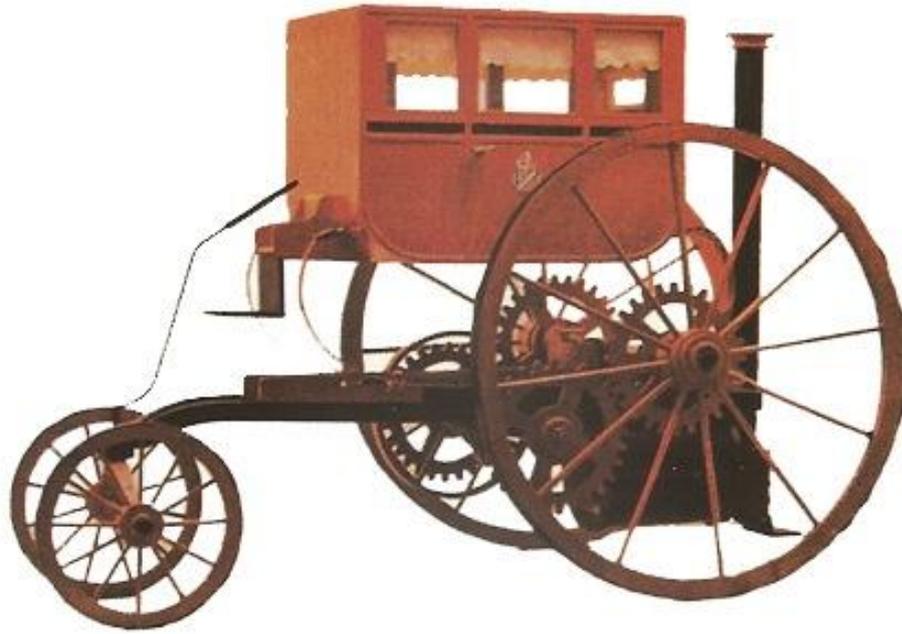
La creación del primer automóvil se atribuye a Nicolás-Joseph Cugnot, oficial de ingenieros del ejército francés, que buscaba una forma de arrastrar los grandes cañones de



artillería. Fue ideado en 1763 y durante la prueba, realizada el 23 de octubre de 1769, chocó contra un muro.

El segundo ejemplar fue desechado. Era un engendro tosco y pesado, todavía en fase experimental. El motor de vapor estaba aún en pañales. Aunque su principio había sido expuesto por el francés Denis Papin, James Watt no patentó su *bomba de fuego* hasta 1769, y su primera aplicación práctica (bombear agua de un mina) data de 1775.

Dado el fracaso del Carro de Cugnot, los británicos atribuyen la construcción del primer automóvil de vapor destinado al transporte de personas a Richard Trevithick. El vehículo alcanzó la escalofriante velocidad de 15 km/h en 1801. En 1803, Oliver Evans construyó en Filadelfia el primer automóvil de vapor en el continente americano. De hecho, ambos constructores se inspiraban en el ferrocarril y buscaban un medio de transporte público que pudiera desplazarse por los caminos en lugar de transitar por las vías férreas.



Automóvil de Richard Trevithick

Desde 1822, en Gran Bretaña funcionaron diligencias de vapor. La construida por Gurney realizaba el trayecto entre Londres y Bath (unos 170 km) a 20 km/h, con 18 pasajeros a bordo.

En 1873, Amedee Bollee comenzó a construir los primeros automóviles propulsados por vapor y creó escuela. Su primer coche, L'Obeissante (El Obediente), ya estaba equipado con suspensión delantera independiente y caja de cambios por engranajes. De Dion-Bouton (1883), Leon Serpollet (1887) y Armand Peugeot (1889) lo imitaron. En 1894, cuando se convocó la

primera carrera de automóviles, la París-Rouen, siete de los veintiún coches inscritos llevaban motores propulsados por vapor.

Decididos a demostrar su supremacía, los defensores de los automóviles de vapor atacaron los récords de velocidad. Leon Serpollet, además de ser un participante habitual en todas las competiciones, consiguió superar los 120 km/h, un coche de los gemelos norteamericanos Stanley alcanzó los 200 km/h, y un modelo más evolucionado alcanzó los 300 km/h.

La desaparición prematura de León Serpollet marco el fin de los coches a vapor en Europa, aunque todavía se mantuvieron vigentes algún tiempo.

En Estados Unidos, a principios del siglo XX, el vapor parecía llevar las de ganar. En 1902, Locomobile (nombre de la antigua fábrica de los Stanley, tras la separación de los socios) vendió 2.750 coches de vapor, convirtiéndose en el mayor fabricante estadounidense. Pero fue el canto del cisne: un año después, Locomobile adoptó los motores de gasolina.

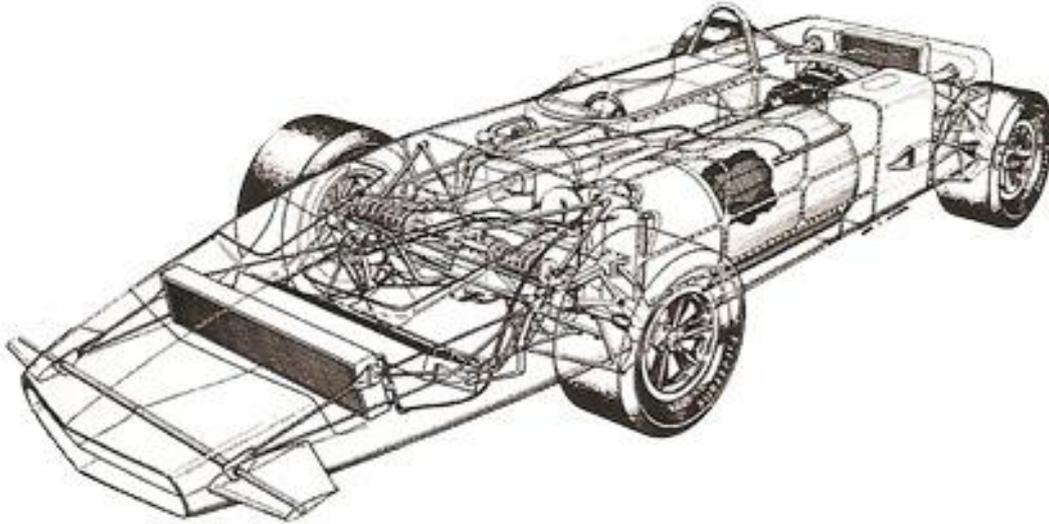
Sin embargo, los automóviles de vapor más avanzados fueron los Doble, que se fabricaron hasta 1930. Llevaban un motor de expansión múltiple con 4 cilindros y 125 CV, capaz de impulsar el auto hasta los 140 km/h. En aquella época, el Ford T costaba 290 dólares y el Doble, que pesaba 2.000 kg, 8.000 dólares. Su elevado

precio y los problemas de producción explican que solo se vendían 45 automóviles.



Doble E

En la década de 1960, varias marcas volvieron a estudiar la posibilidad de adoptar motores de vapor. Las razones eran claras, gases más limpios, combustible más barato, funcionamiento silencioso (combustión en lugar de explosión), y curva favorable de par. A mediados de los años setenta se habían registrado importantes avances tecnológicos, pero se abandonó su producción ante los progresos de los motores tradicionales, de gasolina o diesel.



Lean a Vapor de 1960

5. TRANSPORTE A VAPOR ACUÁTICO

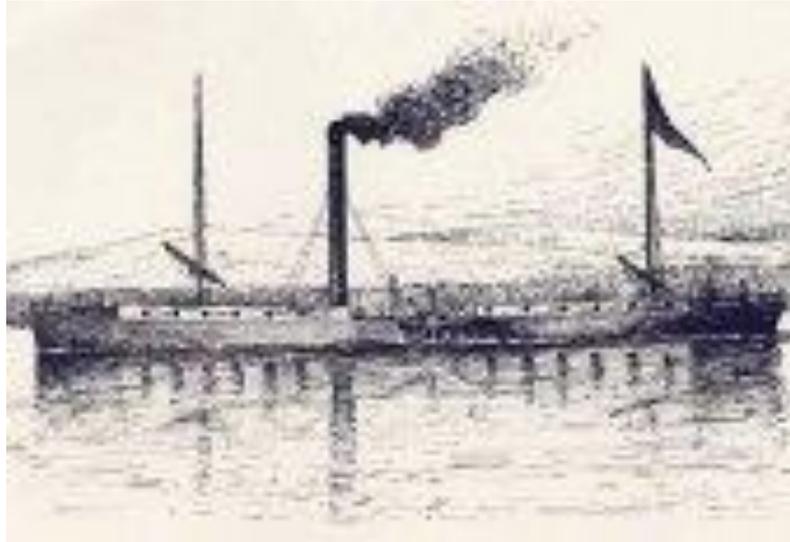
5.1 La propulsión a vapor (1787)

El norteamericano John Finch hizo funcionar en 1787 un barco accionado por vapor pero su proyecto no siguió adelante por falta de apoyo financiero. Fulton realiza 20 años más tarde, a bordo del Clermont el primer viaje de Nueva York a Albany, que realizó la distancia del viaje de ida y vuelta de casi 483 Km en 62 horas.

John Stevens dio un notable impulso a la técnica de construcción naval al establecer en 1804 algunos principios fundamentales para los buques de vapor: la nave estaba equipada

con una caldera de varios tubos, debía emplear vapor a alta presión y tenía que utilizar una hélice en lugar de la rueda de paletas. La hélice estaba provista de cuatro brazos cortos y de forma helicoidal. Con el tiempo sus principios de revelaron básicamente correctos.

Las primeras naves de vapor utilizaban vapor a baja presión, producido en una caldera cuadrada que funcionaba con carbón o leña. El vapor entraba en un único cilindro, donde se expandía y hacía girar el árbol que, a su vez, accionaba la hélice. Como el vapor a baja presión tiene una presión apenas superior a la atmosférica, el empuje que se lograba era modesto y, en la búsqueda de mayor potencia se proyectaron calderas, pistones y cilindros de dimensiones cada vez mayores. Hacia 1860 se introdujeron calderas cilíndricas que posibilitaban la producción de vapor a alta presión. El vapor, podía hacerse pasar por dos o más cilindros de dimensiones crecientes. Hacia finales de siglo, estos motores de doble o triple expansión producían hasta 20.000 caballos de vapor, pero también su utilización se vio limitada por sus enormes dimensiones.



Primer barco a vapor

5.2 Primera prueba española de propulsión a vapor (1543)

En Barcelona, en presencia del Emperador Carlos V y su hijo Felipe II, se realiza la primera prueba en España, de propulsión a vapor del galeón Trinidad, de 200 toneles al mando del Capitán Pedro de Escarza, consiguiéndose una velocidad de tres leguas en dos horas (cinco nudos). El inventor, Blasco de Garay, desarrolló una caldera de agua hirviendo que hacía mover seis ruedas. Posteriormente simplificó el mecanismo a dos ruedas y montándolo en un galeón de 300 toneles, con 50 hombres, consiguió una legua por hora (3,3 nudos) y efectuar la ciaboga en la mitad de tiempo que una galera.

En 1543, Blasco de Garay, oficial de la marina española, después de repetidas representaciones, logró inducir a Carlos V a

que se nombrase una comisión para examinar este descubrimiento, debido a Garay. El resultado fue decisivo; y las playas resonaron con los aplausos de los espectadores al ver las evoluciones náuticas del buque ejecutadas sin el auxilio de velas o remos. Los comisionados dieron al emperador un informe favorable; pero el ministro de hacienda, sea por superstición u otro motivo, desaprobó el proyecto. Este gran descubrimiento, que hubiera sido la gloria y la esperanza de España, quedó sepultado en olvido por más de dos siglos; y Garay, con su genio digno de la edad presente, bajó al sepulcro sin recompensa y sin gloria; de manera que ignoraríamos su nombre si no hubiera sido por Navarrete, cuyas eruditas indagaciones sacaron a luz la existencia de este grande hombre al cabo de cerca de tres siglos.

5.3 Primer vapor construido en España (1817)

El Real Fernando, apodado "El Betis", primer buque a vapor construido en España, y lo que es más, en los astilleros de Triana, fue botado en Sevilla el 30 de mayo, para dedicarse al tráfico fluvial entre esta ciudad y Sanlúcar de Barrameda, diseñado para alcanzar siete nudos, en pocas ocasiones los pudo conseguir, bien por falta de tino del maquinista, por la marea de proa o por una defectuosa estiba o trimado. Fue el inicio de una mejora sustancial en cuanto a comodidad y reducción del tiempo de travesía, pues en muchas ocasiones Sanlúcar-Sevilla se lograba en nueve horas, saliendo con

marea creciente en Bonanza, evitándose viaje en barco a vela de al menos 15 horas de duración o travesías de dos a tres días y de hasta ocho jornadas cuando las condiciones eran extremas.



Maqueta del vapor en el Museo Naval de la Torre del Oro

El día 8 de julio de 1817 hace su aparición el Real Fernando, alias “Betis”, también llamado el “Fernandino”, de la Real Compañía de Navegación del Guadalquivir -el primer vapor abanderado en España-, había efectuado en Sevilla las pruebas oficiales seis días antes y habiendo resultado éstas plenamente satisfactorias, emprendía su viaje inaugural. En él embarcó en Julio de 1843 el General Espartero rumbo a Gibraltar para iniciar su destierro en Inglaterra. Así lo narra Benito Pérez Galdós en el relato Bodas Reales de sus Episodios Nacionales: Espartero llegó al Puerto de Santa María sin más ejército que su escolta, sus ayudantes y un

grupo de fieles amigos (...). Refugiados en el vapor Betis firmó el regente su protesta, último resuello de un poder expirante.

Desde sus comienzos a nuestros días el atraque de los vapores de pasajeros siempre se realizó en puntales y en obligadas ocasiones, en embarcaderos sitios junto a la plaza y muelle de las Galeras Reales. Fue el 12 de diciembre de 1840 cuando el Ayuntamiento otorgó la primera concesión del ya denominado Muelle de los Vapores - situado, al igual que hoy, en la Plaza de las Galeras - a la gaditana Sociedad de Retortillo para el embarque y desembarque de pasajeros y cargamentos de su vapor Betis.

Por iniciativa de la Junta de la Obras del Puerto de Sevilla, en cooperación con el Ayuntamiento, las autoridades de Marina y la Cámara de Comercio se celebró el Primer Centenario del Betis, en 1917.

Para el Centenario se organizaron diversos actos: el día 16 de julio, festividad del Carmen, patrona de los marinos, se procedió a descubrir una lápida colocada en la Torre del Oro, la cual actualmente se conserva en el sevillano monumento. Por otra parte, la Sección de Bellas Artes del Ateneo preparó una procesión fluvial, trasladando un estandarte del Carmen desde el Puente de Triana hacia la Torre del Oro. Finalmente, la Cámara de Comercio dispuso entregas económicas a marinos ancianos o minusválidos.



Lápida conmemorativa del centenario de la botadura del vapor

6. TRANSPORTE A VAPOR FÉRREO EN SEVILLA, EL “PIOJO VERDE”

El “Piojo Verde” es un automotor de Renfe de 39 plazas que fue el único de la zona que funcionó con caldera de vapor alimentada con carbón, por lo que requería de un maquinista y un fogonero, asemejando su funcionamiento al de una locomotora de vapor de principios del siglo pasado.

El automotor, que hizo sus últimos kilómetros transportando pasajeros entre Sevilla y Alcalá de Guadaíra en la década de los años cincuenta de la pasada centuria, acabó sus días haciendo de “Tren Obrero” entre el Depósito diesel de Santa Justa y



la estación sevillana de San Bernardo, donde le sorprendió la inundación del Tamarguillo de 1961, quedando definitivamente inmovilizado.

El apelativo de “Piojo Verde” no le es en vano, pues le fue aplicado debido a los “estragos” que el automotor causaba en los campos andaluces y sus agricultores, pues las furiosas chispas incandescentes que salían despedidas de su chimenea incendiaban pequeñas explotaciones agrícolas anexas al recorrido ferroviario.

Una vez retirado del servicio, en 1961, el “Piojo Verde” permanecería durante varios años en el depósito de Sevilla-San Jerónimo. Cuando las instalaciones ferroviarias fueron levantadas con motivo de las obras de los enlaces ferroviarios de Sevilla impulsadas por la Exposición Universal del 92, todo el material que estaba guardado fue trasladado a Majarabique y posteriormente llevado al Museo del Ferrocarril de Madrid.

Posteriormente, en 1998, se trasladó a Zaragoza, con la intención de ser restaurado en la capital maña, concretamente en la factoría de Carde y Escoriaza, especializada en el montaje de material ferroviario y tranvías y que hoy día ha pasado a denominarse CAF, fabricando en la actualidad las primeras unidades del Metro de Sevilla.

Pero lo cierto es que la construcción de la nueva estación de Zaragoza y el moderno trazado del AVE Madrid-Barcelona dejó todo el material hacinado, cercenando así cualquier posibilidad de que pudieran salir rodando por las vías de ancho RENFE.

Finalmente, a mediados de 2006, nuevamente fue trasladado a la localidad Venta de Baños, en Palencia, siendo cedido a la Asociación Venteña de Amigos del Ferrocarril.



El “Piojo Verde” en la actualidad

7. LA MÁQUINA DE VAPOR DE VAN DER KERCHOVE

7.1 HISTORIA

El electrogenerador Van der Kerchove, más conocido como la “Máquina de vapor”, fue construido en Bélgica en 1920, siendo capaz de producir electricidad. Con un funcionamiento similar a las máquinas de vapor de los ferrocarriles, funcionó entre 1924 y 1968 en una azucarera de Monzón de Cinca (Huesca) y entre 1968 y 1972 en la de Guadalete, en Jerez.

Era uno de los contenidos del Pabellón de los Descubrimientos de la Exposición Universal de 1992 de Sevilla. Tras el incendio de este pabellón la máquina fue colocada en el exterior, junto al Pabellón de la Navegación. Tras Expo '92 quedó abandonada sin ningún tipo de mantenimiento, y allí quedó olvidada durante 19 años a la intemperie, pese a que en España sólo sobreviven tres máquinas similares: en el Museo Nacional de la Ciencia de Madrid, en la Granja de San Ildefonso de Segovia y en Motril.

En 2008, cuando todo apuntaba a su demolición, la Fundación Cajasol la cedió al COIIAOC y tras realizarse las gestiones necesarias fue trasladada a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla

(ETSI), donde fue colocada sobre un pedestal y rodeada de una valla para su protección.

La intención del Ayuntamiento era ubicar la máquina, de 160 toneladas de peso, en una glorieta de la ciudad, pero su difícil conservación no recomendaba exponerla a actos vandálicos. Por eso se decidió instalarla junto a la Escuela. Eso sí, el traslado no fue fácil, su traslado requirió dos meses y medio.

7.2 FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE VAPOR

7.2.1 Ciclo de vapor abierto

El funcionamiento de la máquina de Van Der Kerchove es similar al de la máquina de Watt, haciendo uso de un ciclo de vapor abierto. A continuación se explican las distintas etapas del ciclo de vapor:

1. El vapor se genera en una caldera cerrada, mediante la ebullición de agua gracias al calor aportado por la combustión de carbón. La presión del vapor generado es de 16 kgr/cm².
2. El vapor es introducido en el pistón de doble efecto donde se expande y produce el movimiento del embolo, el cual

está unido a un sistema de biela-manivela y produce un movimiento de rotación del alternador.

3. El vapor, una vez que es expandido, es expulsado mediante el tubo de escape a la atmosfera, donde condensa.

Funcionamiento del sistema de doble pistón de doble efecto:

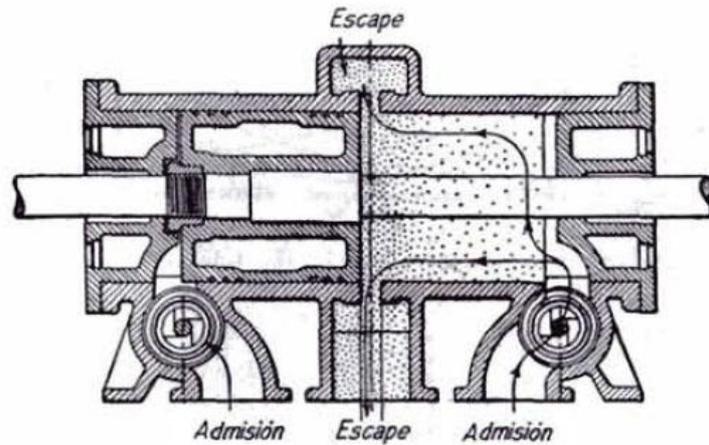
La máquina de Van Der Kerchove está constituida de dos pistones horizontales de doble efecto provistos de un sistema de válvulas de Corliss. La entrada del vapor se produce por los orificios superiores del pistón, y la salida al tubo de escape, por los conductos laterales, regulada mediante una válvula manual de asiento.

El funcionamiento de las válvulas de admisión es tal que cuando el pistón está próximo a una entrada de vapor, esta válvula de admisión se abre, permaneciendo cerrada la otra válvula de admisión del mismo cilindro y abierta la lumbrera de escape del extremo opuesto. Cuando el vapor se ha expandido y ha empujado el pistón hacia el otro extremo del cilindro, se cierra la válvula de entrada, y se destapa la lumbrera de escape que antes permanecía cerrada, abriéndose ahora la válvula de entrada antes cerrada para permitir la entrada de vapor en la cámara del cilindro de la cara

opuesta del pistón, produciendo el movimiento de éste en la otra dirección y repitiendo el proceso.

Las válvulas de Corliss están accionadas mediante excéntricas, varillas y levas de un árbol situado a un lado de la máquina y paralelamente a ella, movido por el cigüeñal a través de engranajes cónicos. El regulador es de tipo compuesto de inercia y centrifugo, y va movido por el árbol de levas.

En las máquinas de vapor de contracorriente pueden producirse grandes pérdidas por condensación inicial, debido a que el vapor expansionado enfría las paredes y lumbreras del cilindro. Las máquinas de equicorriente o de sentido único, como es el caso de la máquina de Van Der Kerchove, reducen las pérdidas de condensación utilizando válvulas de entrada independiente, alimentadas con vapor vivo, en cada extremo del cilindro, tal y como se puede apreciar en la figura.



Corte esquemático de una máquina de vapor con alimentación unidireccional

El vapor de escape tiene una sola dirección, saliendo por lumbreras situadas en las paredes del cilindro y equidistantes de los extremos de éste. El émbolo del cilindro actúa de válvula de escape y, alternativamente, tapa las lumbreras de escape desde cada extremo del cilindro.



Imagen donde se puede ver el sistema de válvulas y regulador de la máquina de Van Der Kerchove

7.3 FUNDAMENTOS DEL GENERADOR SÍNCRONO

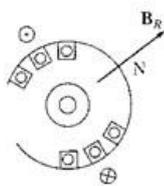
7.3.1 Construcción del generador síncrono

En un generador sincrónico se aplica una corriente dc al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético. Entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados del estator del generador.

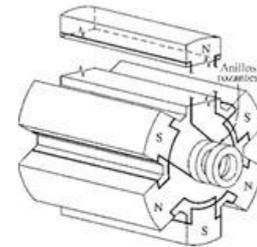
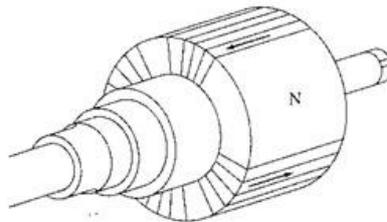
Dos términos muy utilizados para describir los devanados de una máquina son devanados de campo y devanados de armadura. En general, el término "devanados de campo" se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina, y el término "devanados de armadura" se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. En las máquinas sincrónicas, los devanados de campo están sobre el rotor, de modo que los términos "devanados del rotor" y "devanados de campo" se utilizan indistintamente. De igual manera se emplean los términos "devanados estáticos" y "devanados de armadura".

En esencia, el rotor de un generador sincrónico es un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser contruidos

salientes o no salientes. El término saliente significa "proyectado hacia fuera" o "prominente"; un polo saliente es un polo magnético que se proyecta hacia fuera de la superficie del rotor. Por otro lado, un polo no saliente es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor.



Rotor de polos no salientes



Rotor de polos salientes

Los rotores de polos no salientes se utilizan en rotores de dos y cuatro polos, mientras que los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro o más polos. Puesto que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables se construye con láminas delgadas agrupadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Se debe suministrar una corriente dc al circuito de campo del rotor. Puesto que el rotor está girando, se requiere un arreglo especial para entregar potencia dc a sus devanados de campo. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia dc:

1. Suministrar la potencia dc desde una fuente de externa al rotor por medio de anillos rozantes y escobillas.

2. Suministrar la potencia dc desde una fuente especial montada directamente en el eje del generador sincrónico.

Los anillos rozantes son anillos metálicos que circundan el eje de la máquina pero se encuentran aislados de él. Un extremo del devanado del rotor está unido a cada uno de los dos anillos rozantes colocados sobre el eje de la máquina sincrónica, y una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante. Una "escobilla" es un bloque de un compuesto de carbón grafitado que conduce la electricidad libremente y tiene muy baja fricción para no desgastarse con el anillo rozante. Si se conecta el extremo positivo de una fuente de voltaje dc a una escobilla y el extremo negativo a la otra, se aplicará igual voltaje dc al devanado de campo en todo momento, sin tener en cuenta la posición angular o la velocidad del rotor.

Los anillos rozantes y las escobillas crean algunos problemas cuando se utilizan para suministrar potencia dc a los devanados de campo de la máquina sincrónica pues exigen más mantenimiento en la máquina ya que se deben revisar con regularidad las escobillas debido a su desgaste. Además, la caída de tensión en las escobillas puede causar pérdidas significativas de potencia en las máquinas que tienen grandes corrientes de campo. A pesar de estos problemas, los anillos rozantes y las escobillas se utilizan en todas

las máquinas sincrónicas pequeñas ya que ningún otro método de suministro de la corriente de campo es adecuado por el costo.

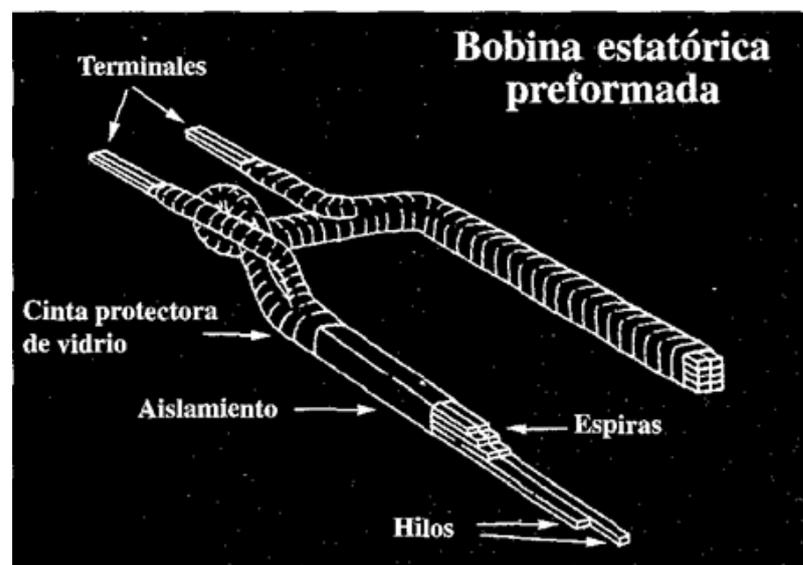
En generadores y motores grandes, se utilizan excitadores (o excitatrices) sin escobillas para suministrar la corriente de campo de a la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador ac pequeño cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador es rectificadora a corriente directa por un circuito rectificador trifásico montado también en el eje del generador y se incluye en el circuito principal de campo dc. Controlando la pequeña corriente dc de campo del generador excitador (localizado sobre el estator), es posible ajustar la corriente de campo de la máquina principal sin anillos rozantes ni escobillas. Puesto que nunca existen contactos mecánicos entre el rotor y el estator, un excitador sin escobillas requiere mucho menos mantenimiento que los anillos rozantes y escobillas.

Para que la excitación de un generador sea completamente independiente de cualquier fuente de potencia externa, se incluye con frecuencia un pequeño excitador piloto en el sistema. Un excitador piloto es un pequeño generador ac de imanes permanentes montados en el eje rotor y un devanado trifásico, montado sobre el estator. Este generador produce la potencia para el circuito de campo del excitador que, a su vez, controla el circuito de campo de la máquina principal. Si un excitador piloto se incluye

sobre el eje del generador, no se requiere potencia eléctrica externa para accionar el generador.

Muchos generadores sincrónicos que incluyen excitadores sin escobillas tienen también anillos rozantes y escobillas, de manera que disponen de una fuente auxiliar de corriente dc de campo en caso de emergencia.

La construcción de los devanados del estator en las máquinas ac reales es muy complicada. El estator de las máquinas ac normales consta de varias bobinas en cada fase, distribuidas en ranuras alrededor de la superficie interna del estator. En máquinas más grandes, cada bobina es una unidad preformada que consta de cierto número de espiras aisladas entre sí y del lado del estator en sí.



Bobina estática preformada

El voltaje en cada espira sencilla de conductor es muy pequeño, y sólo disponiendo varias de estas vueltas en serie se pueden producir voltajes razonables. El gran número de espiras se divide físicamente entre varias bobina y éstas se colocan en ranuras espaciadas en la superficie del estator, como se puede observar en la siguiente imagen.



Estator bobinado

El espaciamiento en grados entre ranuras adyacentes en el estator se llama paso de ranura y del estator. El paso de ranura se puede expresar en grados mecánicos o en grados eléctricos.

Excepto en máquinas muy pequeñas, las bobinas del estator se forman normalmente en devanados de doble capa, como se muestra en la siguiente imagen.



Estator con devanados de doble capa

Los devanados de doble capa son más fáciles de fabricar (menos ranuras para un número dado de bobinas) y sus conexiones en los extremos son más sencillas que en los devanados de capa sencilla. En consecuencia, son menos costosos de elaborar.

Efecto del paso de bobina en las máquinas ac:

En el diseño de una máquina sencilla ac, los voltajes de salida de las bobinas del estator son sinusoidales debido a que la distribución de la densidad de flujo en el entrehierro es sinusoidal. Si la distribución de la densidad de flujo en el entrehierro no fuese sinusoidal entonces, los voltajes de salida en el estator tampoco

serian sinusoidales y tendrían la misma forma no sinusoidal de la distribución de la densidad de flujo.

La distribución de la densidad de flujo en el entrehierro de una máquina ac no es sinusoidal. Los diseñadores de máquinas se esfuerzan para producir distribuciones de flujo sinusoidales pero, claro está, ningún diseño es siempre perfecto. La distribución real del flujo constará de una componente fundamental sinusoidal más armónicas. Estas componentes armónicas de flujo generarán componentes armónicas en los voltajes y corrientes del estator.

Dado que las componentes armónicas son indeseables en los voltajes y corrientes del estator, se han desarrollado técnicas para suprimirlas en las corrientes y voltajes de salida de la máquina. Una técnica importante para suprimir las armónicas es utilizar devanados de paso fraccionado (o devanado de cuerdas).

El paso de una bobina:

El paso polar es la distancia angular entre dos polos adyacentes en una máquina. El paso polar de una máquina en grados mecánicos es

$$\rho_p = \frac{360^\circ}{P}$$

donde ρ_P es el paso polar en grados mecánicos y P es el número de polos de la máquina. Independientemente del número de polos de la máquina, un paso polar es siempre 180 grados eléctricos.

Si la bobina del estator se extiende a través del mismo ángulo que el paso polar, se llama bobina de paso pleno (o devanado diametral). Si la bobina del estator se extiende a través de un ángulo menor que un paso polar, se llama bobina de paso fraccionado (o bobina de cuerdas). Con frecuencia el paso de una bobina de paso fraccionado se expresa como una fracción que indica la parte del paso polar que atraviesa. Por ejemplo, una bobina de 5/6 de paso atraviesa los cinco sextos de la distancia entre dos polos adyacentes. Alternativamente, en grados eléctricos, el paso de una bobina de paso fraccionado está dado por las ecuaciones

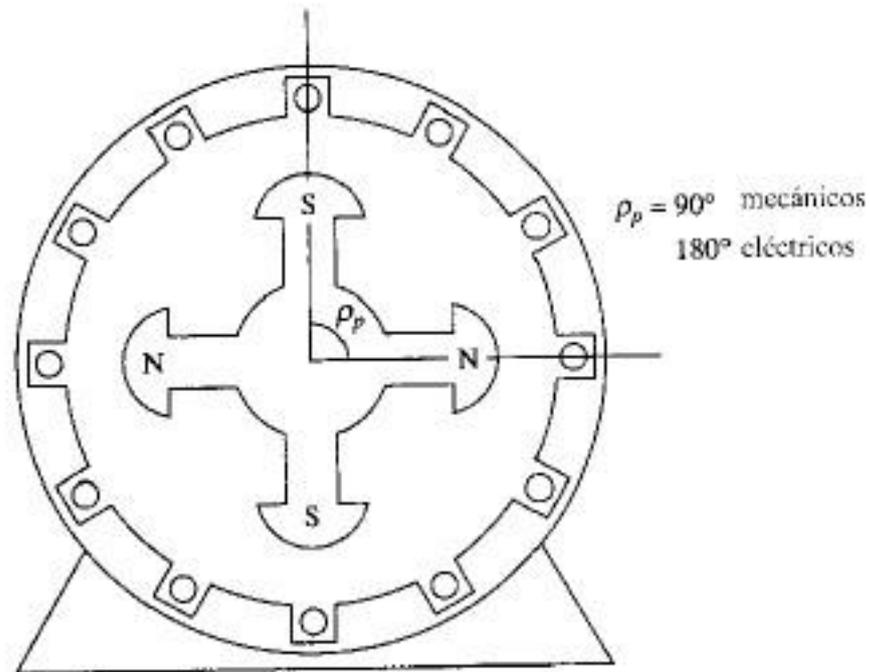
$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_P} \times 180^\circ$$

donde θ_m es el ángulo mecánico cubierto por la bobina en grados y ρ_P es el paso polar de la máquina en grados mecánicos o

$$\rho = \frac{\theta_m P}{2} \times 180^\circ$$

donde θ_m es el ángulo mecánico cubierto por la bobina en grados y P es el número de polos de la máquina. La mayoría de las bobinas estáticas prácticas tienen un paso. Los devanados que utilizan

bobinas de paso fraccionado se conocen como devanados de cuerdas.

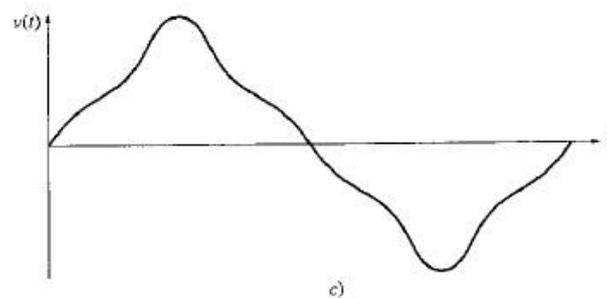
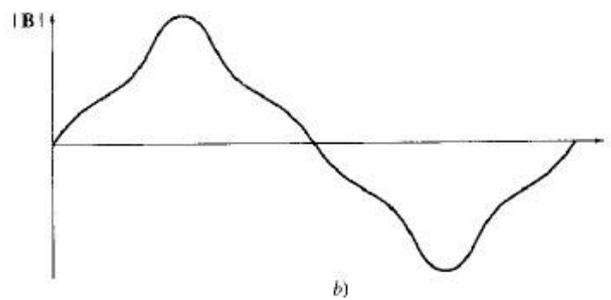
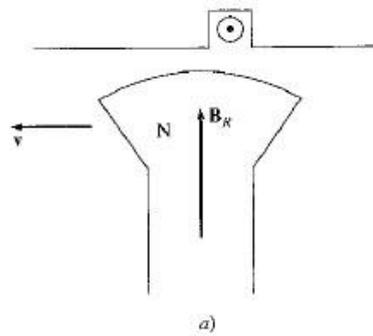


El paso polar de una máquina de cuatro polos es 90° mecánicos o 180° eléctricos.

Problemas de armónicas y devanados de paso fraccionado:

Existe una muy buena razón para utilizar devanados de paso fraccionado (devanados de cuerdas), la cual se refiere al efecto de la distribución de densidad de flujo no sinusoidal en las máquinas reales. Este problema se puede entender examinando la máquina mostrada en la siguiente figura, que muestra una máquina síncrona de polos salientes cuyo rotor "está barriendo" a través de

la superficie del estator. Debido a que la reluctancia del camino del campo magnético es mucho menor directamente debajo del centro del rotor que hacia los lados (menor entrehierro), el flujo está fuertemente concentrado en ese punto, y la densidad de flujo es muy alta allí. El voltaje inducido resultante en el devanado no es sinusoidal pues contiene muchas frecuencias armónicas componentes.



a) Rotor ferromagnético que barre a su paso un conductor del estator. b) Distribución de la densidad de flujo del campo ferromagnético como función del tiempo en un punto de la superficie del estator. c) Voltaje inducido resultante en el conductor. Nótese que el voltaje es directamente proporcional a la densidad de flujo magnético en cualquier tiempo dado.

Debido a que la onda de voltaje resultante es simétrica alrededor del centro del flujo del rotor, no están presentes armónicas pares en el voltaje de fase. Sin embargo, todas las armónicas impares (tercera, quinta, séptima, novena, etc.) están presentes en algún grado en el voltaje de fase y deben ser tenidas en cuenta en el diseño de las máquinas ac. En general, cuanto mayor sea el número de una frecuencia armónica componente, menor es su magnitud en el voltaje de salida de fase; en consecuencia, más allá de cierto punto (por sobre la novena armónica y mayores) los efectos de las armónicas mayores pueden ser ignorados.

Cuando las tres fases están conectadas en Y o en Δ , algunas de las armónicas desaparecen de la salida de la máquina como resultado de la conexión trifásica. La componente de tercera armónica es una de éstas.

Nótese que las componentes de tercera armónica del voltaje son todas idénticas en cada fase. Si la máquina sincrónica está

conectada en Y, el voltaje de tercera armónica entre dos terminales cualesquiera será cero (aun cuando podría haber una gran componente de tercera armónica de voltaje en cada fase). Si la máquina está conectada en Δ las tres componentes de tercera armónica se suman todas y generan una corriente de tercera armónica en el interior del devanado en Δ de la máquina. Puesto que los voltajes de tercera armónica han caído a través de las impedancias internas de la máquina, no hay componentes significativas de voltaje de tercera armónica en los terminales.

Este resultado se aplica no sólo a las componentes de tercera armónica sino también a cualquier componente múltiplo de tercera armónica (como la novena armónica). Tales frecuencias armónicas especiales son llamadas *armónicas triple n* y se suprimen automáticamente en máquinas trifásicas.

Las restantes frecuencias armónicas son la quinta, séptima, décimo primera, décimo tercera, etc. Puesto que la intensidad de las componentes armónicas de voltaje disminuyen con el aumento de la frecuencia, la mayor parte de la distorsión real en la salida sinusoidal de una máquina sincrónica es causada por las frecuencias de quinta y de séptima armónicas llamadas a veces armónicas de cinturón. Si pudiera encontrarse alguna forma de reducir estas componentes, la salida de la máquina sería una senoide pura a la frecuencia fundamental (50 ó 60Hz).

¿Cómo puede eliminarse algo de contenido de armónicas del voltaje de los terminales del devanado?

Puede diseñarse el rotor en sí para que distribuya el flujo en forma aproximadamente sinusoidal. Aunque este hecho ayudará a reducir el contenido de armónicas del voltaje de salida, quizá no sea suficiente. Un paso adicional consiste en diseñar las máquinas con devanados de paso fraccionado.

La clave para lograr el efecto deseado de los devanados de cuerdas en el voltaje producido en el estator de la máquina es que el ángulo eléctrico de la n ésima armónica sea n veces el ángulo eléctrico de la componente de frecuencia fundamental. En otras palabras, si una bobina cubre 150° eléctricos a su frecuencia fundamental, cubrirá 300° eléctricos a su frecuencia de segundo armónico, 450° eléctricos a su frecuencia de tercer armónico y así sucesivamente. Si ρ representa el ángulo eléctrico cubierto por la bobina a su frecuencia fundamental y v es el número de la armónica que está examinándose la bobina cubrirá $v\rho$ grados eléctricos a esa frecuencia armónica. En consecuencia, el factor de paso de la bobina a la frecuencia armónica puede expresarse como

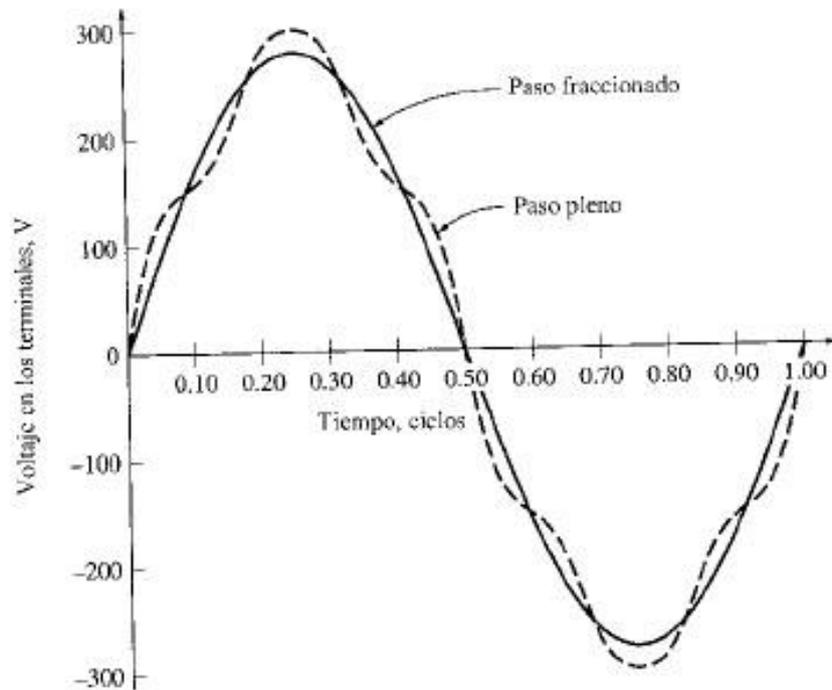
$$k_p = \sin \frac{v\rho}{2}$$

En este caso, lo importante reside en que el factor de paso de un devanado es diferente para cada frecuencia armónica. Si se elige de manera adecuada el paso de bobina, casi es posible eliminar las componentes de frecuencia armónica a la salida de la máquina.

En consecuencia, el uso de devanados de paso fraccionado reducirá drásticamente el contenido de armónicas del voltaje de salida de la máquina y ocasiona sólo una pequeña disminución en su voltaje fundamental.

El voltaje en los terminales de una máquina sincrónica se muestra en la siguiente imagen, tanto para devanados de paso pleno (diametral) como para devanados de paso fraccionado.

Nótese que los devanados de paso fraccionado mejoran la calidad de la forma de onda.



Voltaje de salida a la línea de un generador trifásico con devanados de paso pleno y de paso fraccionado. Aunque el voltaje máximo del devanado de paso fraccionado es ligeramente menor que el del devanado de paso pleno, la onda de salida es mucho más pura

7.3.2 Velocidad de rotación de un generador síncrono

Los generadores sincrónicos son por definición sincrónicos, lo cual significa que la frecuencia eléctrica producida está entrelazada o sincronizada con la tasa mecánica de rotación del generador. Un rotor de generador síncrono consta de un electroimán al cual se suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta

en cualquier dirección según gire el rotor. La relación entre la tasa de giro de los campos magnéticos de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

Dónde:

f_e = frecuencia eléctrica, en Hz

n_m = velocidad mecánica del campo magnético en r/min
(igual a la velocidad del rotor para máquinas síncronas)

P = número de polos

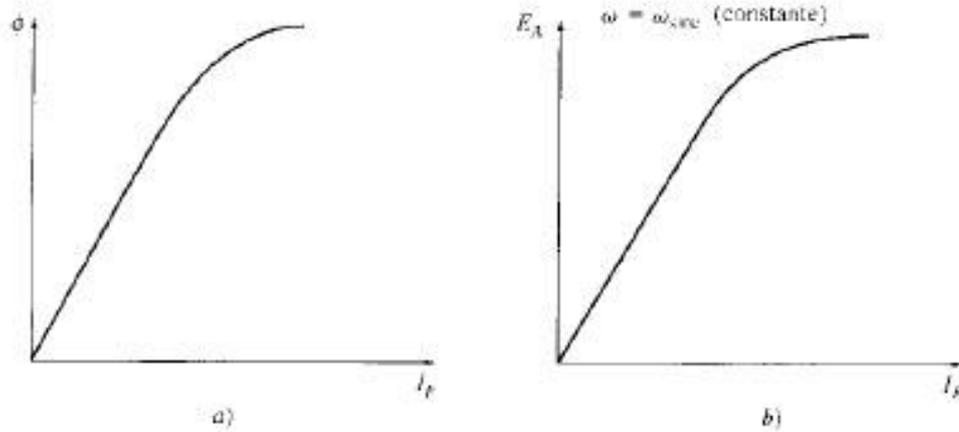
Puesto que el rotor gira con la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante. Dado que la potencia eléctrica es generada a 50 ó 60Hz, el generador debe girar a una velocidad fija que depende del número de polos de la máquina. Por ejemplo, para generar potencia a 60Hz en una máquina de dos polos, el rotor debe girar a 3600 r/min. Para generar potencia a 50 Hz en una máquina de cuatro polos, el rotor debe girar a 1500 r/min. La tasa de rotación necesaria para una frecuencia dada puede calcularse siempre mediante la ecuación anterior.

7.3.3 Circuito equivalente de un generador síncrono

El voltaje E_A es el voltaje interno generado, en una fase del generador síncrono. Sin embargo, este voltaje E_A no es usualmente el voltaje que aparece en los terminales del generador. En efecto, la única vez en la cual el voltaje interno E_A es el mismo voltaje de salida V_ϕ de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina. ¿Por qué el voltaje de salida V_ϕ de una fase no es igual a E_A , y qué relación hay entre los dos voltajes? La respuesta a estas preguntas lleva al modelo de generador síncrono.

Existen varios factores que ocasionan la diferencia entre E_A y V_ϕ :

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido.
2. La autoinductancia de las bobinas de la armadura.
3. La resistencia de las bobinas de la armadura.
4. El efecto de la forma de los polos salientes del rotor.



- a) Gráfica del flujo contra la corriente de campo para un generador síncrono.
- b) Curva de magnetización del generador sincrónico.

Se estudiarán los efectos de los tres primeros factores y se desarrollará un modelo de la máquina a partir de ellos. En este capítulo, se ignorarán los efectos de la forma de los polos salientes en la operación de la máquina sincrónica; en otras palabras, en este capítulo se supondrá que todas las máquinas tienen rotores cilíndricos o de polos no salientes. Partiendo de estos supuestos, las respuestas que se obtengan serán un poco inexactas si la máquina tiene polos salientes, pero los errores serán relativamente mínimos.

El primer efecto mencionado y normalmente el mayor de ellos es la reacción del inducido. Cuando gira el rotor de un generador, se induce un voltaje E_A en las bobinas estáticas del mismo. Si se conecta una carga a los terminales del generador, fluye una

corriente, pero el flujo de corriente trifásica estática produce un campo magnético propio en la máquina. Este campo magnético estático distorsiona el campo magnético del rotor cambiando el voltaje de fase resultante. Este efecto se llama reacción del inducido debido a que la corriente del inducido (estator) afecta al campo magnético que la produce en primera instancia.

Para entender la reacción del inducido, remítase a la siguiente figura. La figura a) muestra un rotor de dos polos girando dentro de un estator trifásico. No hay carga conectada al estator. El campo magnético rotor B_R produce un voltaje interno generado E_A cuyo valor pico coincide con la dirección de B_R . El voltaje será positivo hacia fuera de los conductores en la parte superior, y negativo hacia dentro de los conductores en la parte inferior de la figura. Cuando no hay carga en el generador, no hay flujo de corriente en el inducido y E_A será igual al voltaje de fase V_ϕ .

Supóngase ahora que se conecta el generador a una carga con factor de potencia en atraso. Debido a que la carga está en atraso, la corriente pico ocurrirá a un ángulo atrás del voltaje pico. Este efecto se muestra en la figura b).

La corriente que fluye en los devanados del estator produce un campo magnético propio. Este campo magnético estático se llama B_S y su dirección está dada por la regla de la mano derecha, según

se muestra en la figura c). El campo magnético del estator B_S produce un voltaje propio en el estator, denominado E_{stat} la figura 1.

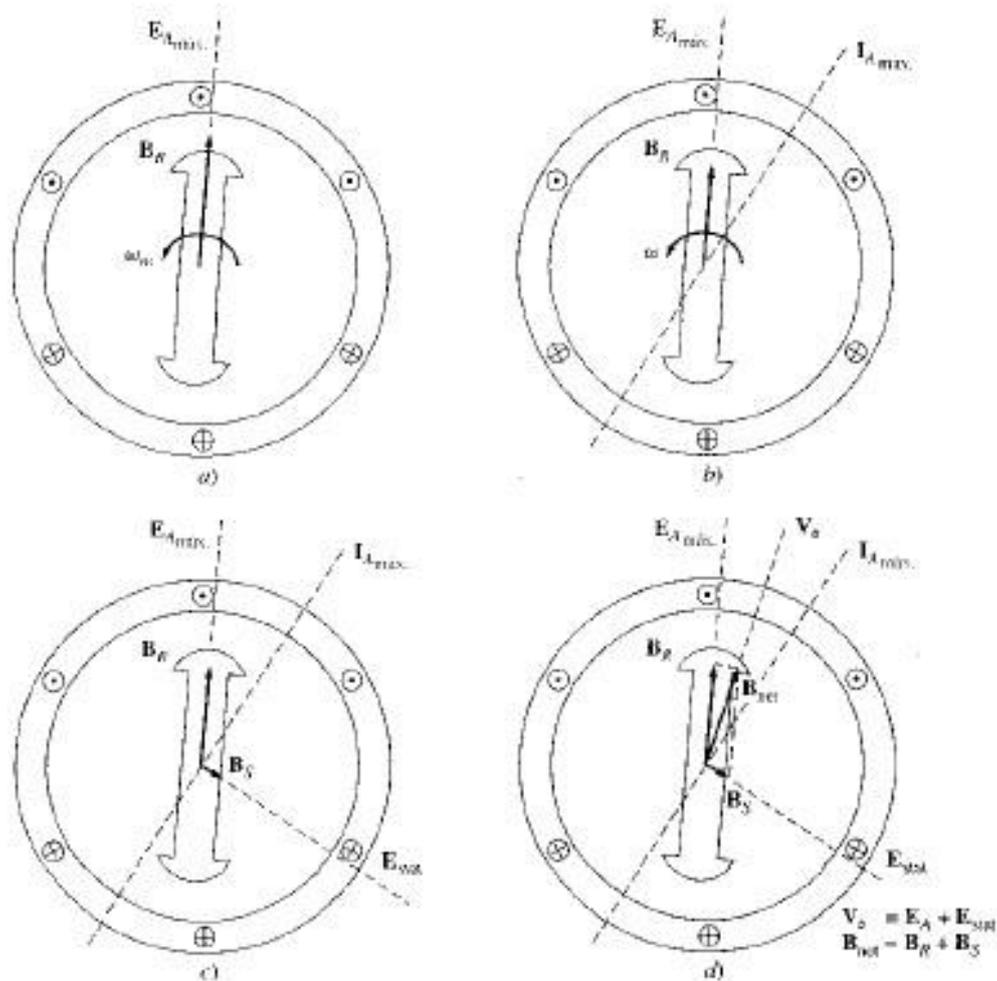


Figura 1

Desarrollo de un modelo para la reacción del inducido. a) un campo magnético rotacional produce el voltaje interno generado EA. b) El voltaje resultante produce un flujo de corriente en atraso cuando se

conecta a una carga con factor de potencia en atraso. c) La corriente estática produce su propio campo magnético B_S , el cual produce su propio voltaje E_{stat} en los devanados estáticos de la máquina. d) El campo B_S se suma a B_R y se transforma en B_{net} . El voltaje E_{stat} se suma a E_A y se producen V_ϕ de salida de fase.

Con dos voltajes presentes en los devanados estáticos, el voltaje total de una fase es la suma del voltaje interno generado E_A y el voltaje de reacción del inducido E_{stat} :

$$V_\phi = E_A + E_{stat}$$

El campo magnético B_{net} es la suma de los campos magnéticos del rotor y el estator:

$$B_{net} = B_R + B_S$$

Puesto que los ángulos de E_A y B_R son iguales y los ángulos de E_{stat} y B_S también son iguales, el campo magnético resultante B_{net} coincidirá con el voltaje neto V_ϕ . Los voltajes y corrientes resultantes se muestran en la figura d) anterior.

¿Cómo se pueden modelar los efectos de la reacción de inducido en el voltaje de fase?

Primero, nótese que el voltaje E_{stat} un ángulo de 90° atrás del plano de la corriente máxima I_A .

Segundo, el voltaje E_{stat} es directamente proporcional a la corriente I_A . Si X es una constante de proporcionalidad, el voltaje de reacción de inducido puede expresarse como

$$E_{stat} = -jXI_A$$

El voltaje en una fase es entonces

$$V_\phi = E_A - jXI_A$$

Obsérvese el circuito de la figura 2. La ley de voltajes de Kirchhoff para este circuito es

$$V_\phi = E_A - jXI_A$$

Ecuación igual a la que describe el voltaje de la reacción del inducido. Entonces, el voltaje de reacción del inducido se puede modelar mediante una inductancia en serie con el voltaje interno generado.

Además de los efectos de la reacción del inducido, los devanados del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si llamamos L_A la autoinductancia del estator (y X_A a su correspondiente reactancia), mientras que la resistencia del estator es llamada R_A , la diferencia total E_A y V_ϕ está dada por

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A$$

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinductancia de la máquina son representados por reactancias, y es costumbre combinarlas en una sola llamada *reactancia sincrónica* de la máquina:

$$X_S = X + X_A$$

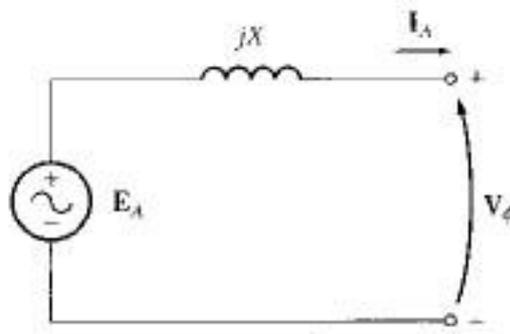


Figura 2

La ecuación final que describe a V_{ϕ} es

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$

Es posible esquematizar el circuito equivalente de un generador sincrónico trifásico. El circuito equivalente completo de este generador se muestra en la figura 3, donde aparece una fuente dc de potencia alimentando el circuito de campo del rotor, modelado

por la inductancia de la bobina y la resistencia en serie. En serie con R_f se encuentra una resistencia ajustable R_{adj} que controla el flujo de la corriente de campo. El resto del circuito equivalente consta de los modelos para cada fase. Cada fase tiene un voltaje interno generado con una inductancia en serie X_s (resultado de la suma de la reactancia del inducido y la autoinductancia de la bobina) y una resistencia R_A . Aunque los voltajes y las corrientes de las tres fases están desfasados 120° , en los demás éstas son idénticas.

Estas tres fases se pueden conectar bien sea en Y o en Δ , como se muestra en la figura 4.

Si se conectan en Y , el voltaje en los terminales V_T estará relacionado con el voltaje de fase por

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi$$

Si las bobinas se conectan en Δ ,

$$V_T = V_\phi$$

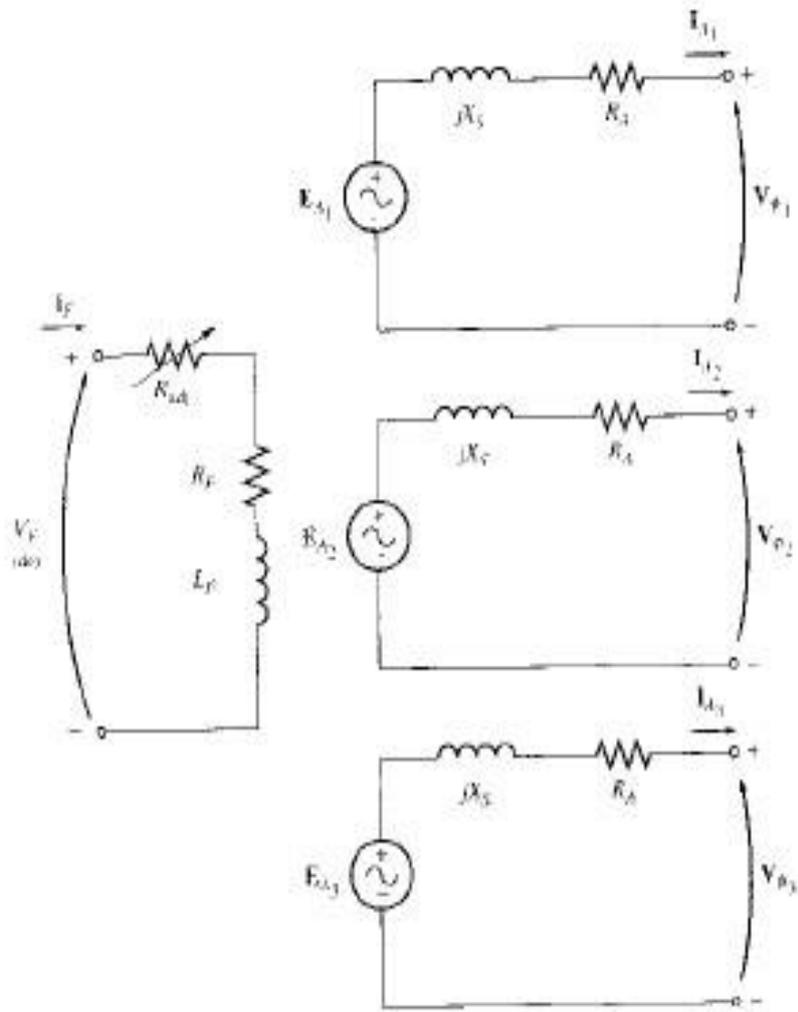


Figura 3: Circuito equivalente completo de un generador sincrónico trifásico

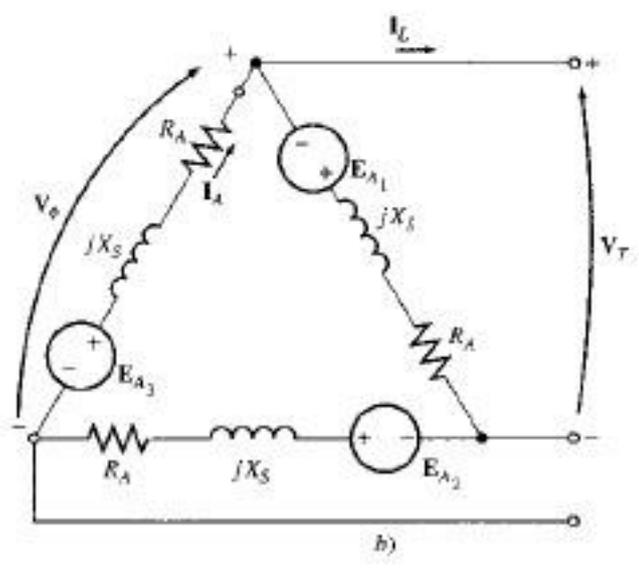
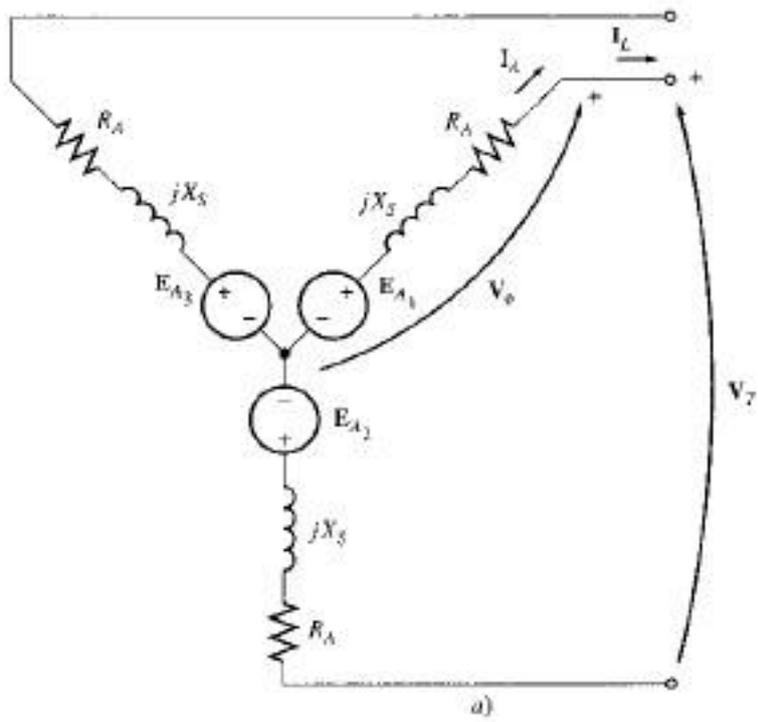


Figura 4: Circuito equivalente del generador conectado en a) Y y b) en Δ

El hecho de que las tres fases de los generadores sincrónicos sean idénticas en todos los aspectos, excepto en el ángulo de fase, conduce a utilizar normalmente el circuito equivalente por fase. El circuito equivalente por fase de esta máquina se muestra en la figura 5. Se debe tener en cuenta un factor importante al utilizar el circuito equivalente por fase: las tres fases tienen igual voltaje y corriente sólo cuando las cargas conectadas a ellas están balanceadas.

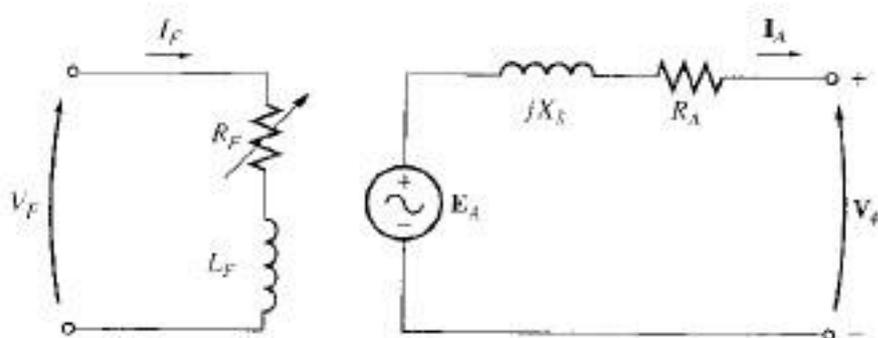


Figura 5

Circuito equivalente por fase de un generador sincrónico. La resistencia interna del circuito de campo y la resistencia externa variable se han combinado en una sola resistencia R_F .

7.3.4 Diagrama Fasorial de un generador sincrónico

Debido a que los voltajes en un generador sincrónico son alternos, usualmente se expresan como fasores. Puesto que los fasores tienen magnitud y ángulo, la relación entre ellos deber ser expresada por un dibujo bidimensional. Cuando los voltajes en una

fase (E_A , V_ϕ , $jX_S I_A$, y $R_A I_A$) y la corriente I_A en la fase se grafican de tal forma que muestren relaciones entre ellos, el dibujo resultante se llama diagrama fasorial.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de generador alimentando una carga cuyo factor de potencia es igual a la unidad (carga puramente resistiva).

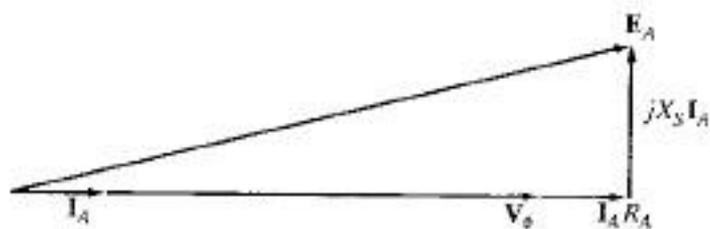


Figura 6
Diagrama fasorial de un generador sincrónico con factor de potencia unitario.

Alternativamente, para una corriente de campo y una magnitud de corriente de carga dada, el voltaje en los terminales es menor para cargas en atraso y mayor para cargas en adelante.

En las máquinas sincrónicas reales, dado que la reactancia sincrónica es mucho mayor que la resistencia del devanado R_A , ésta se desprecia con frecuencia en el estudio cualitativo de las variaciones de voltaje. Para hallar resultados numéricos exactos, se debe considerar R_A .

7.3.5 Potencia y Par en los generadores sincrónicos

Un generador sincrónico es una máquina sincrónica utilizada como generador para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica o un equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe cumplir la propiedad básica de que su velocidad sea casi constante, independientemente de la demanda de potencia. Si esto no se cumple, la frecuencia resultante del sistema de potencia podría presentar fallas.

No toda la potencia mecánica que entre en el generador sincrónico se convierte en potencia eléctrica a la salida de la máquina. La diferencia entre la potencia de salida y la de entrada representa las pérdidas de la máquina. La figura 7 muestra un diagrama de flujo de potencia para un generador sincrónico.

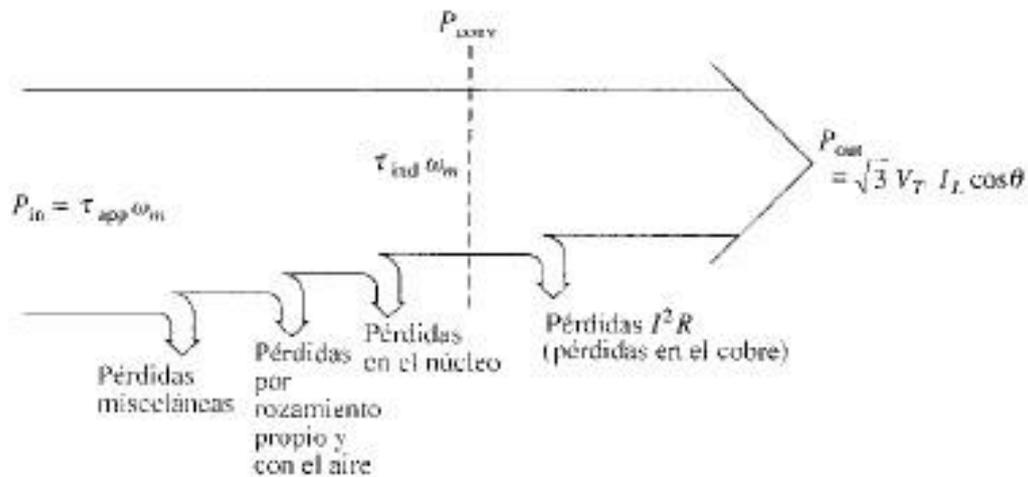


Figura 7: Diagrama de flujo de potencia en un generador sincrónico

La diferencia entre la potencia de entrada al generador y la potencia convertida en el generador representa las pérdidas mecánicas, en el núcleo, y las pérdidas misceláneas de la máquina.

La potencia eléctrica real de salida del generador sincrónico se puede expresar en cantidades de línea a línea como

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta$$

Y en cantidades de fase como

$$P_{out} = 3 V_\phi I_A \cos \theta$$

La potencia reactiva a la salida puede ser expresada en cantidades de línea a línea como

$$Q_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \text{sen}\theta$$

O en cantidades de fase como

$$Q_{out} = 3V_\phi I_A \text{sen}\theta$$

7.3.6 Voltaje, velocidad y frecuencia nominales

La frecuencia nominal de un generador sincrónico depende del sistema de potencia al cual está conectado. Las frecuencias comúnmente utilizadas hoy día en los sistemas de potencia son 50 Hz (en Europa, Asia, etc.), 60Hz (en las Américas) y 400Hz (en aplicaciones especiales y de control). Una vez se conozca la frecuencia, hay únicamente una velocidad de rotación posible para un número de polos dados. La relación fija entre la frecuencia y la velocidad está dada por la ecuación:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

cómo se describió anteriormente.

Quizá el valor nominal más obvio es el voltaje de operación al cual se diseña el generador. El voltaje de generación depende del flujo, la velocidad de rotación y la construcción mecánica de la máquina. Para un tamaño de estructura mecánica y velocidad dadas, cuanto mayor sea el voltaje deseado, mayor será el flujo requerido en la máquina. Sin embargo, el flujo no puede ser incrementado indefinidamente ya que hay siempre un máximo permisible de corriente de campo.

Otra consideración para fijar el máximo voltaje admisible es el punto de ruptura del aislamiento de los devanados (los voltajes normales de operación no deben estar muy cercanos al valor del punto de ruptura de su aislamiento).

7.3.7 Valores nominales de potencia aparente

Existen dos factores que determinan los límites de potencia de las máquinas eléctricas. Uno es el par mecánico aplicado al eje de la máquina y el otro es el calentamiento de los devanados de la máquina. En todos los motores y generadores sincrónicos prácticos, el eje tiene suficiente capacidad mecánica para manejar mucha mayor potencia de estado estacionario que la de dimensionamiento nominal de la máquina; en consecuencia los límites prácticos de

estado estacionario están dados por el calentamiento de los devanados.

Hay dos devanados en un generador sincrónico y cada uno de ellos debe ser protegido de sobrecalentamiento. Estos dos devanados son el del inducido (armadura) y el de campo. La máxima corriente aceptable del inducido fija la potencia nominal aparente del generador puesto que la potencia aparente S está dada por

$$S = 3V_{\phi} I_A$$

Donde

V_{ϕ} : Voltaje

I_A : Corriente

Si se conoce el voltaje nominal, la máxima corriente aceptable del inducido, determina los kilovoltamperes del generador:

$$S_{nominal} = 3V_{\phi,nominal} I_{A,máx}$$

Es importante tener en cuenta que para el calentamiento de los devanados del inducido, no es importante el factor de potencia de la corriente del inducido. El efecto de calentamiento por pérdidas en el cobre del estator está dado por

$$P_{SCL} = 3I_A^2 R_A$$

y es independiente del ángulo de la corriente con respecto al voltaje $V\phi$. Debido a que el ángulo de la corriente es irrelevante para el calentamiento del inducido, estas máquinas están dimensionadas en kilovoltamperes en vez de kilowatts.

El otro devanado que nos concierne es el de campo. Las pérdidas en el cobre del devanado de campo están dadas por

$$P_{RCL} = I_F^2 R_F$$

tal que el máximo calentamiento permisible fija una máxima corriente de campo en la máquina.

7.3.8 Resumen

Un generador sincrónico es un dispositivo para convertir potencia mecánica de un motor primario en potencia eléctrica ac de voltaje y frecuencia específicos. El término sincrónico se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de esta máquina está confinada o sincronizada con su tasa mecánica de rotación del eje. El generador sincrónico se utiliza para producir la gran mayoría de potencia eléctrica utilizada en todo el mundo.

El voltaje interno generado en esta máquina depende de la tasa de rotación del eje y de la magnitud del flujo de campo. El voltaje de fase de la máquina difiere del voltaje interno generado por efecto de la reacción del inducido en el generador y por la resistencia y reactancia internas de los devanados del inducido. El voltaje en los terminales del generador será igual al voltaje de fase o está relacionado a éste por $\sqrt{3}$ dependiendo de si la conexión de la máquina es Δ o es Y .

La capacidad de un generador sincrónico para producir potencia eléctrica está limitada en principio por el calentamiento interno de la máquina. Cuando se sobrecalientan los devanados del generador, la vida de la máquina puede acortarse bastante. Puesto que el generador tiene dos devanados diferentes (el del inducido y el de campo), también tiene dos restricciones separadas. El calentamiento máximo permisible en los devanados del inducido establece los kilovoltamperes máximos admisibles de la máquina.

7.4 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR DE LA MÁQUINA DE VAN DER KERCHOVE

Características de la máquina de vapor:

- Velocidad del cigüeñal: 105 r.p.m.

Características del alternador:

- Tensión de trabajo: 500 V trifásica a 50 Hz
- Potencia: 1200 KVA

El funcionamiento del alternador de la máquina de Van Der Kerchove es básicamente el de un generador síncrono, de manera que al aplicarse una corriente continua al rotor, y al estar éste girando gracias al mecanismo de biela-manivela impulsado por la máquina de vapor, crea un campo magnético rotacional en el interior de la máquina el cual induce una corriente trifásica en los devanados del estator.

A continuación se explicaran detalladamente las distintas partes que componen el alternador:

Rotor:

De los dos tipos de configuraciones de rotor que predominan para la creación del campo magnético, sean estas de polos salientes y polos no salientes, el rotor de la máquina de Van Der Kerchove es del primer tipo, constando este de 56 polos salientes, como se puede ver en la imagen.



Detalle de un polo saliente del rotor

La elección de 56 polos salientes se obtiene de despejar P de la siguiente expresión, como se vio anteriormente:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

Siendo f_e 50 Hz al estar operando en Europa y la velocidad de rotación n_m de 105 rpm impuesta por el mecanismo de biela-manivela de la máquina de vapor.

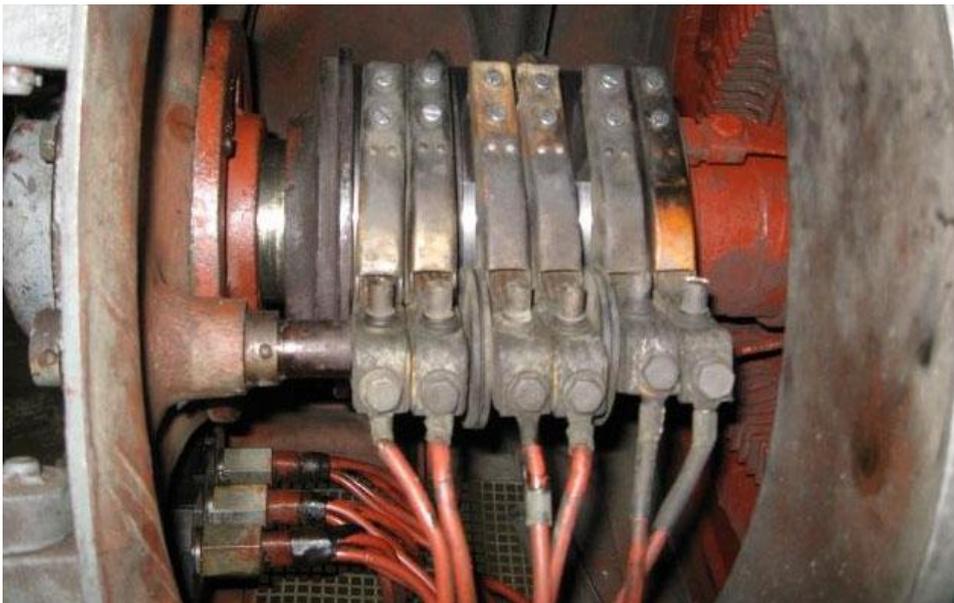
El bobinado del rotor no se conserva, pero en la siguiente imagen se puede ver un rotor de las mismas características, bobinado, es cual sirve para hacerse una idea de cómo sería el de la máquina de Van Der Kerchove.



Bobinado de rotor de polos salientes

Para suministrar la corriente continua al rotor para poder crear en este el campo magnético, de los dos mecanismos habituales explicados anteriormente, mediante anillos rozantes y escobillas o mediante una fuente externa montada directamente en el eje del rotor, en esta máquina se optó por la primera opción, aunque lamentablemente esas piezas no se conservan junto con la máquina actualmente.

En la siguiente imagen se puede ver el sistema de anillos rozantes y escobillas, montado en otra máquina, el cual es similar al que estaría montado en la máquina de Van Der Kerchove.



Sistema de anillos rozantes y escobillas

Estator:

El devanado del estator, tal y como se vio anteriormente, consta de varias bobinas espaciadas en ranuras alrededor de la superficie interna del estator, como se puede observar en la siguiente imagen.



Devanado estático en ranuras espaciadas

Las bobinas del estator se forman en devanados de doble capa, que son más fáciles de fabricar, ya que se requiere de menos ranuras para un número dado de bobinas, y además sus conexiones en los extremos son más sencillas que en devanados de una sola capa.



Detalle del bobinado en dos capas del estator de la máquina de Van Der Kerchove

Otro dato a considerar es la corriente máxima admisible en el inducido del estator, ya que esta determina la potencia nominal aparente del generador.

De la siguiente ecuación:

$$S_{nominal} = 3V_{\phi,nominal} I_{A,m\acute{a}x}$$

Y sabiendo que los datos nominales de potencia de la maquina según la placa identificativa que la acompaña, son de 1200 KVA y la

tensión nominal de 500 V trifásica, se obtiene que la corriente máxima admisible en el devanado del inducido es de 800 A, valor límite para no sufrir sobrecalentamiento en dicho devanado.

En la siguiente imagen se puede ver un detalle de cómo queda montado el alternador completo, observándose el pequeño entrehierro existente entre los polos salientes del rotor y las bobinas del estator, necesario para que pueda existir movimiento, pero de tamaño mínimo para que las pérdidas sean lo menores posibles.



Detalle de montaje del alternador

Como se puede observar en la imagen, el hecho de que falten piezas debido al mal estado de conservación que sufrió la maquina tras su retirada del servicio deja ver, como es el montaje de los polos salientes en el rotor. En la imagen, rodeado en rojo se puede observar un orificio a través del cual se insertaría un perno unido al polo, el cual se fijaría al rotor mediante una tuerca gracias al surco existente en el rotor en toda su superficie interior.

7.5 DESCRIPCIÓN DE LA ANIMACIÓN DE MOVIMIENTO DE LA MAQUINA DE VAN DER KERCHOVE

Con el propósito de mostrar cómo era el movimiento de la máquina, sobre todo el sistema de biela-manivela que mueve el rotor del alternador, cuando ésta estaba en funcionamiento, se ha realizado una animación mediante el software Solid Edge V20.

El procedimiento ha sido el siguiente:

Partiendo de los archivos suministrados de los modelos cad de cada una de las piezas que componen la máquina de Van Der Kerchove, se han modificado los mismos y se han creado los faltantes, para que todas las piezas encajen en el montaje y no existan interferencias físicas de unas con otras en el movimiento.

Una vez se comprobó que todo encajaba sin interferencias, se procedió con el montaje de la maquina mediante relaciones cinemáticas para imponer los grados de libertad de cada una de las piezas que la componen.

Para conseguir el movimiento del cigüeñal, simulando que este se mueve por efecto del mecanismo de biela-manivela de la máquina de vapor, se asignó un motor de movimiento al cigüeñal, de 630 grados/segundo que equivale a los 105 rpm del movimiento nominal del cigüeñal, según indica la placa identificativa que acompaña a la máquina.

La animación comienza con la maquina en estado explosionado, de manera que a medida que avanza la misma se aprecia el montaje de la máquina. Una vez que la maquina está completamente ensamblada, esta empieza a moverse a la velocidad nominal.

Para poder apreciar con una mayor claridad el movimiento de los pistones, el mecanismo de biela-manivela y la rotación del cigüeñal, pasados unos segundos de la animación desde que la maquina empieza a moverse, las piezas que están fijas pasan a un estado translucido, y la velocidad de rotación del cigüeñal se reduce en 3,5 veces para poder apreciar mejor la parte móvil de la máquina.

8. BIBLIOGRAFÍA

- **Máquinas Eléctricas (3º edición):** Stephen J. Chapman, editorial Mc Graw Hill
- **La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases:** W. H. Severns, H. E. Degler, J. C. Miles, editorial Reverté
- **Diario ABC Sevilla,** fecha 05/08/2015
- **Blog:** www.betislayer.com
- **Diario el Correo de Andalucía,** fecha 09/12/2009
- **Tecnología e Imperio:** N. García Tapia, J. Carrillo Castillo, editorial Nivola
- **Máquinas, una historia ilustrada:** Sigvard Strandh, Hermann Blume Ediciones

9. LISTA DE PLANOS

Plano nº 0	Vista isométrica conjunto
Plano nº 1	Vista alzado conjunto
Plano nº 2	Vista derecha conjunto
Plano nº 3	Vista izquierda conjunto
Plano nº 4	Vista planta conjunto
Plano nº 5	Vista subconjuntos
Plano nº 6	Vista despiece conjunto alternador
Plano nº 7	Vista despiece conjunto máquina de vapor
Plano nº 8	Bancada
Plano nº 9	Estator superior
Plano nº 10.....	Estator inferior
Plano nº 11.....	Rotor
Plano nº 12.....	Cilindro
Plano nº 13.....	Soporte cigüeñal
Plano nº 14.....	Cigüeñal
Plano nº 15.....	Embolo
Plano nº 16.....	Biela
Plano nº 17.....	Cierre cilindro
Plano nº 18.....	Bulón
Plano nº 19.....	Eje apertura válvulas
Plano nº 20.....	Cojinete
Plano nº 21.....	Cubierta inferior biela

Plano nº 22.....	Cubierta superior biela
Plano nº 23.....	Cubierta inferior engranaje
Plano nº 24.....	Cubierta superior engranaje
Plano nº 25.....	Cierre válvula vapor
Plano nº 26.....	Manivela válvula vapor
Plano nº 27.....	Válvula vapor
Plano nº 28.....	Perno fijación rotor
Plano nº 29.....	Tuerca fijación rotor
Plano nº 30.....	Cierre entradas vapor
Plano nº 31.....	Perno unión rotor
Plano nº 32.....	Tuerca unión rotor
Plano nº 33.....	Perno unión estator
Plano nº 34.....	Tuerca unión estator
Plano nº 35.....	Tornillo entradas vapor
Plano nº 36.....	Tornillo fijación estator
Plano nº 37.....	Tornillo unión cilindro
Plano nº 38.....	Tornillo válvula vapor
Plano nº 39.....	Tornillo unión cierre cilindro
Plano nº 40.....	Tornillo fijación cierre cilindro