

# GENERADOR TRIFÁSICO CON IMANES PERMANENTES, BOBINADO SERIE Y FLUJO TRANSVERAL

Horizontal axis generator with permanent magnets and  
transversal flow

Presentación: xx/10/2024

**Horacio R. di Prátula,**

GESE UTN FRBB

[hrdiprat@frbb.utn.edu.ar](mailto:hrdiprat@frbb.utn.edu.ar)

**Eduardo Guillermo**

GESE UTN FRBB

[eguiller@frbb.utn.edu.ar](mailto:eguiller@frbb.utn.edu.ar)

**Marcelo Antón**

GESE UTN FRBB

[maraleanton@gmail.com](mailto:maraleanton@gmail.com)

**Mario Zabaloy**

[mariozabaloy@frbb.utn.edu.ar](mailto:mariozabaloy@frbb.utn.edu.ar)

**Martín Di Petro**

[mdipietro@frbb.utn.edu.ar](mailto:mdipietro@frbb.utn.edu.ar)

**Horacio Delbianco**

[hdelbianco@frbb.utn.edu.ar](mailto:hdelbianco@frbb.utn.edu.ar)

## Resumen

El diseño del generador presentado en este trabajo es inédito, es de flujo transversal, con bobinado en serie, bajo peso en el sistema de rotación, baja velocidad de rotación y un mínimo de material magnético (chapas de acero al Si orientado). Puede usarse en sistemas eólicos, hidro cinéticos u otros sistemas renovables que requieren generación eléctrica.

El punto de partida conceptual fue el diseño de un generador de potencia superior a los 5 MW para aprovechamiento del recurso eólico en el mar.

El esbozo creado a partir de la máquina eléctrica mencionada presenta características totalmente diferentes especialmente en el estator, el tipo de material utilizado, el bobinado y la estructura general.

Si bien la máquina genera tensión trifásica, la señal deberá ser rectificadas y a través de un inversor obtener una tensión de valores nominales (tensión, frecuencia, forma de onda, etc) adecuada para los sistemas de nuestro País.

El concepto se aplicó luego al diseño de un generador monofásico compacto que posee una característica especial ya que permite conseguir mediante el montaje mecánico de dos o tres máquinas señales eléctricas bifásicas o trifásicas.

Palabras clave: Generador Eléctrico –Flujo Transversal – Imanes Permanentes – Geometría Espacial Cilíndrica – Bobinado Serie.

## Abstract

The design of the generator presented in this work is unprecedented, it is transverse flow, with series winding, low weight in the rotation system, low rotation speed and a minimum of magnetic material (oriented Si steel sheets). It can be used in wind, hydrokinetic or other renewable systems that require electrical generation.

The conceptual starting point was the design of a generator with a power greater than 5 MW to take advantage of the wind resource at sea.

The sketch created from the aforementioned electrical machine presents totally different characteristics, especially in the stator, the type of material used, the winding and the general structure.

Although the machine generates three-phase voltage, the signal must be rectified and, through an inverter, obtain a voltage of nominal values (voltage, frequency, waveform, etc.) suitable for the systems of our country.

The concept was then applied to the design of a compact single-phase generator that has a special characteristic since it allows two-phase or three-phase electrical signals to be achieved through the mechanical assembly of two or three machines.

Keywords: Electric Generator – Transverse Flow – Permanent Magnets – Cylindrical Spatial Geometry – Series Winding.

## Introducción

El concepto inicial del diseño que exhibo en este trabajo tuvo como partida un generador presentado por Dmitry Svechkarenko, 2007. Se decidió el uso de imanes permanentes porque se consideraron una serie de ventajas en dicho aspecto de diseño [2] entre los que podemos citar:

1. evita la utilización de sistema de excitación y los dispositivos que se requieren para producir los campos magnéticos evitando al mismo tiempo las pérdidas en dicho sistema,
2. se logra una mayor potencia de salida por unidad de volumen,
3. mejor performance dinámica (mayor densidad de flujo magnético en el entrehierro),
4. simplificación en la construcción y mantenimiento y reducción del precio según el tipo de máquina

Estos aspectos optimizan los pequeños generadores dónde la inversión debe ser menor para lograr un mejor recupero de la inversión inicial. En los grandes generadores la inversión inicial se requiere porque el recupero de la inversión se basa en el alto rendimiento de los dispositivos.

Al mismo tiempo el diseño particular cilíndrico se eligió considerando que el aerogenerador será de eje horizontal y la disposición para un diseño con flujo transversal trifásico permite mayor cantidad de imanes aumentando la densidad magnética, pero disminuyendo el volumen total del aerogenerador.

El diseño con flujo transversal permite, además, una mayor tensión generada y mayor frecuencia mejorando la rectificación. El análisis de la máxima energía posible producida por los imanes en el generador (Santos J et al (2005)) es:

$$W_m = \frac{(B-H)_{\max} V N}{2} \quad (1)$$

Siendo V el volumen del imán, N el número de imanes y finalmente  $(B-H)_{\max}$  depende de las características magnéticas del imán elegido. Esta ecuación permitirá obtener la potencia del aerogenerador considerando las posibles velocidades del mismo en relación al fluido y el diseño utilizado (álabes, transmisión, caja de engranajes, etc.:

$$P_m = W_m \omega = \frac{(B-H)_{\max} V N \omega}{2} \quad (2)$$

Basándose en estos elementos de juicio, inicialmente, puede determinarse la posible potencia del aerogenerador en función del número de polos y la velocidad. Si consideramos el tipo de imán (Vorgelegt Von et al (2006)) (ver Figura. 1), la cantidad y el volumen individual, podemos finalmente determinar el tamaño final del generador.

General Property Comparison of magnetic materials					
Magnet Material	Cost	Max. Magnetic Energy	Max Working Temperature	Corrosion Resistance	Magnetic Properties
Alnico	Moderate	9.0 MGOe	550°C	Fair	Medium
Ceramic	Very Low	3.5 MGOe	350°C	Excellent	Low
Bonded Ferrite	Moderate	2.1 MGOe	150°C	Excellent	Low
SmCo5	Very High	22 MGOe	250°C	Excellent	High
Sm2Co17	Very High	32 MGOe	375°C	Excellent	High
Sintered NdFeB	Moderate High	50 MGOe	200°C	Poor	Very High
Bonded NdFeB	High	12 MGOe	150°C	Poor	Medium
Low Energy Flexible	Low	0.7 MGOe	85°C	Good	Very Low
High Energy Flexible	Moderate Low	1.6 MGOe	85°C	Good	Low

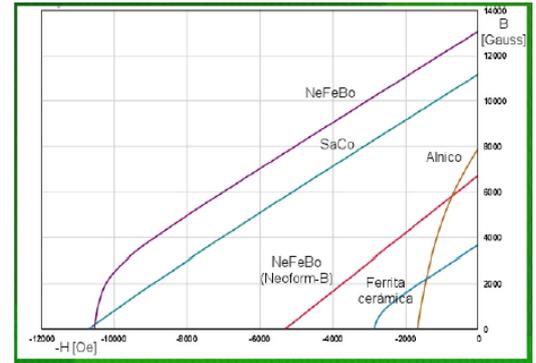


Figura 1: curva de desimantación de diferentes imanes (Dr. Ing. Prof. Mario Guillermo Macri, 2012)

En la Figura 2 se observan las curvas de imanes de diferentes materiales (hard and soft). El material elegido NdFeB pertenece a los denominados hard (Figura 2) (ancho en H).

El material denominado soft se caracteriza por alta saturación de campo ( $B_s$ ), alto valor de permeabilidad ( $\mu$ ) y bajo valor coercitivo ( $H_c$ ) (Figura 2). El material denominado hard, tiene las características (Figuras. 3 y 4):

1. Alto valor coercitivo  $H_c$
2. Alta remanencia  $B_r$
3. Gran energía almacenada por unidad de volumen en el campo magnético externo
4. Esto depende del producto  $(BH)_{max}$  en el segundo cuadrante (Figura. 3)

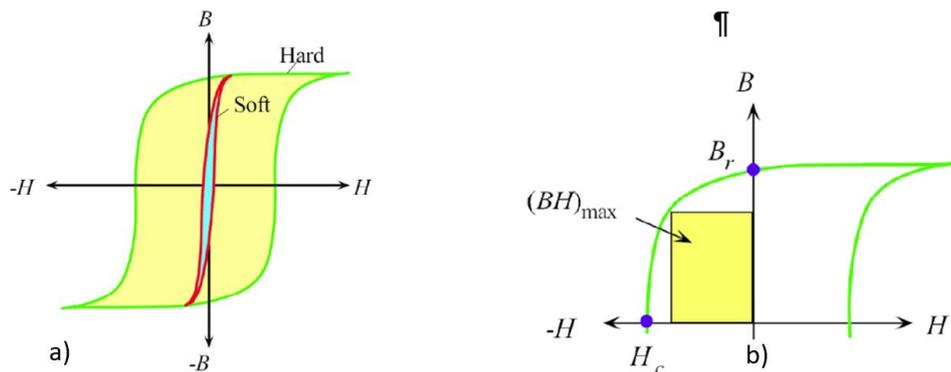


Figura 2: a) materiales magnéticos hard (ancho en H) y soft (fino en H) b)  $(BH)_{max}$  de un material magnético hard (S.O. Kasap (2005))

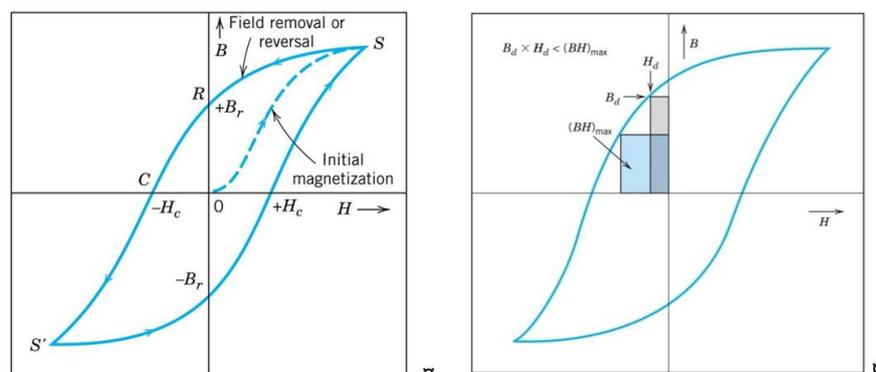


Figura 3: material magnético hard y sus características (S. Palmir Apayr (2012))

## Desarrollo

### Elección de Materiales y Diseño Preliminar

Datos del sistema, comenzando por el imán elegido: Neodimio.

Para obtener la energía se usarán los siguientes conceptos –

$W_m$  = energía máxima-

BHm característica del imán =  $BH_{max} = 44.5 \cdot 10^6$  G Oe

N número de imanes colocados en la máquina = 20

V volumen de cada imán. =  $2,42 \cdot 10^{-6}$  m<sup>3</sup>

Separación entre imanes 0,011 m

Superficie de los imanes =  $0,022$  m<sup>2</sup>  $\cdot$   $0,022$  m

N (número de imanes) = 20

BHd =  $3.54 \cdot 10^5$  Pa

BHm =  $3.541 \cdot 10^5$  J/m<sup>3</sup>

$\mu_0$  =  $1.257 \cdot 10^{-6}$  H/m

Para el diseño se adoptó un modelo geométrico que permita la utilización de los imanes sobre una base rotante que irá solidaria al eje, mientras que los conductores estarán dispuestos sobre el estator fijo.

Los datos magnéticos dan origen a la figura 4 que muestra las curvas de desmagnetización y su aplicación al cálculo magnético de la máquina eléctrica en diseño.

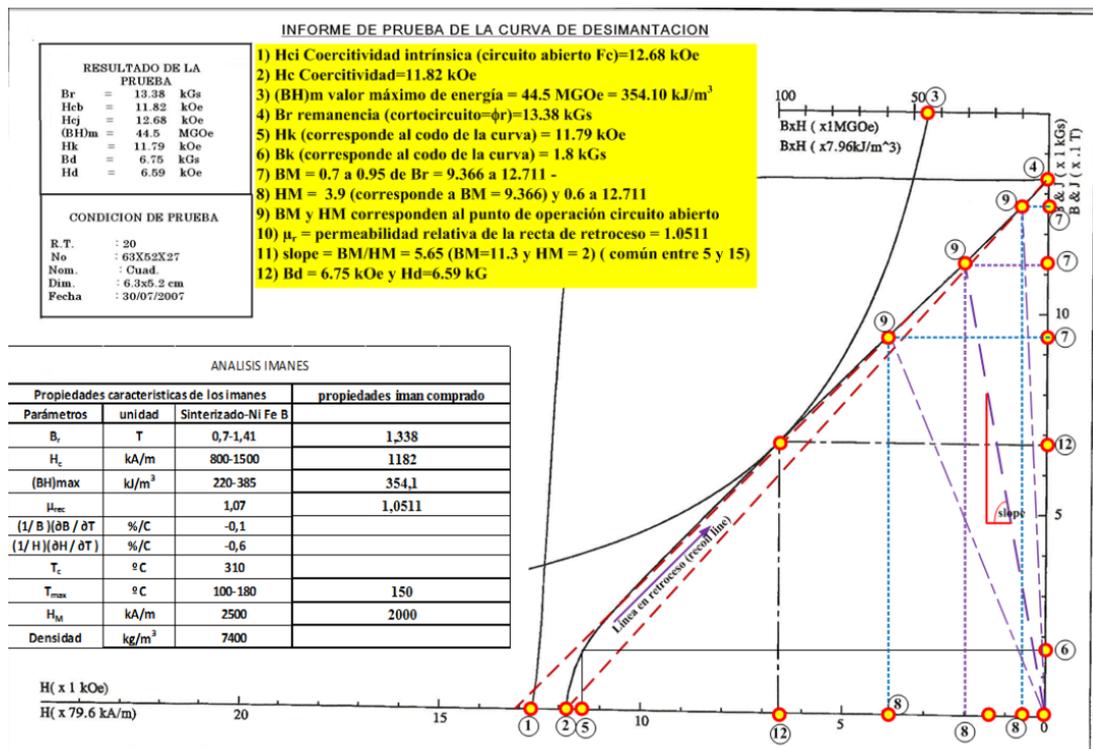


Figura 4: curva de desmagnetización del imán utilizado en la máquina eléctrica prototipo

## Diseño estructural y Análisis Teórico

### Diseño del Rotor

La Figura 5 muestra la geometría del dispositivo rotórico.

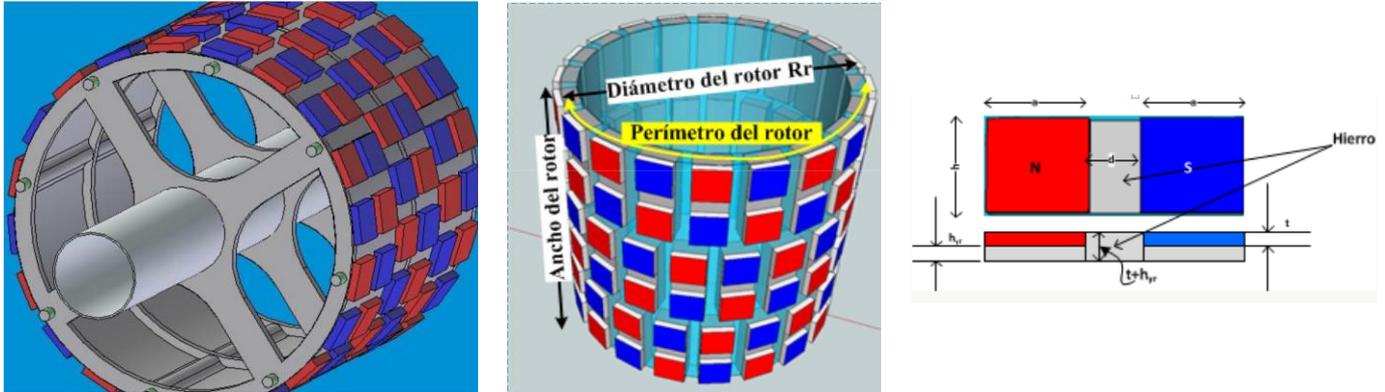


Figura 5: Rotor y posición de los imanes

$$\text{Ancho del rotor} = N^{\circ} \text{ imanes} \times h + \text{excedente} + \text{espacio entre dos líneas de imanes} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Radio del rotor} = \text{perímetro} / (2\pi) \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Perímetro} = N^{\circ} \text{ imanes de una fase} \times (a+d) \dots\dots\dots(5)$$

La determinación de la frecuencia de generación se realiza en función de la velocidad de giro del dispositivo y el número de polos totales existentes.

$$f = \frac{P \cdot \text{velocidad}}{2 \cdot 60} \dots\dots\dots(6)$$

Si adoptamos en una matriz de 1x10 la velocidad tendremos:

$vel := \begin{bmatrix} 100 \\ 150 \\ 200 \\ 250 \\ 300 \\ 350 \\ 400 \\ 450 \\ 550 \\ 600 \end{bmatrix} \text{ rpm}$	$\rightarrow$	$\omega = \begin{bmatrix} 10.472 \\ 15.708 \\ 20.944 \\ 26.18 \\ 31.416 \\ 36.652 \\ 41.888 \\ 47.124 \\ 57.596 \\ 62.832 \end{bmatrix} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\dots\dots\dots(7)$
---	---------------	--	----------------------

Luego lograremos:

$$W_m = \frac{(BH_{\max} \text{ Vol } P)}{2} = 51.418 \text{ J} \Rightarrow P_m = \omega W_m \text{ (ecuación 8)}$$

$vel =$	$rpm$	$f =$	$Hz$	$\omega =$	$\frac{rad}{s}$	$P_m =$	$kW$
100	33.333	10.472	0.538				
150	50	15.708	0.808				
200	66.667	20.944	1.077				
250	83.333	26.18	1.346				
300	100	31.416	1.615				
350	116.667	36.652	1.885				
400	133.333	41.888	2.154				
450	150	47.124	2.423				
550	183.333	57.596	2.961				
600	200	62.832	3.231				

.....(8)

## Diseño del Estator

La distribución del bobinado respecto a los imanes del rotor se efectuará de modo que al girar el mismo, los imanes producirán un flujo (ver Figura 6) tal que irá variando según la posición del rotor relativo al estator. Esto permite multiplicar el número de conductores concatenados simultáneamente y la tensión surgirá directamente del múltiplo de vueltas por la tensión unidad generada. De este modo se podrá inducir mayor tensión en bornes de salida de la máquina con velocidades menores.

El núcleo será laminado conformando una pila de chapas de espesor adecuado. El bobinado estará en serie eléctrica ya que la tensión inducida estará instantáneamente en fase por simultaneidad de variación de flujo a lo largo del mismo. En la Figura 6 puede verse el camino del flujo y cortes del conjunto rotor y estator del generador

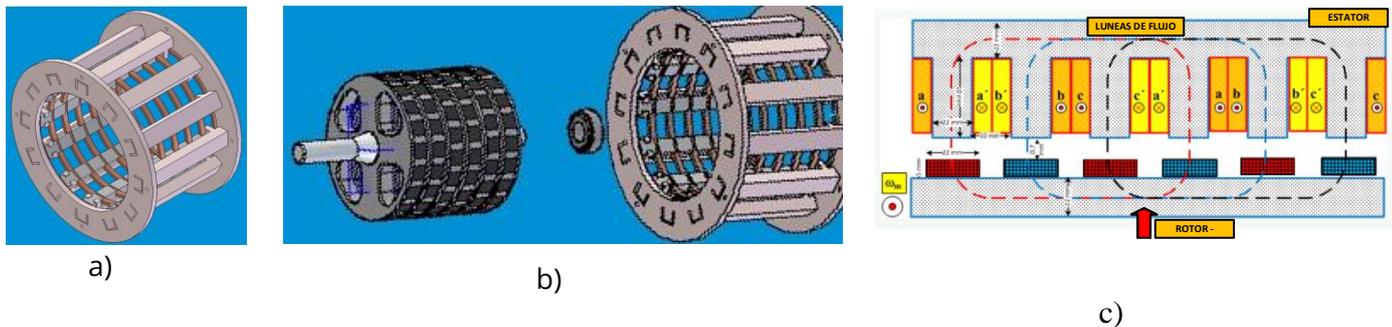


Figura 6: a) Estator bobinado – b) rotor y estator – c) circuito magnético (imanes y estator concatenado)

Como se puede ver el hierro del estator es mínimo y el resto es “delrin” (material termoplástico, semi cristalino de gran dureza y resistencia, excelentes resultados en su mecanización y con múltiples aplicaciones. La resina acetálica o delrin posee elevada rigidez, resistencia mecánica y a la fatiga)

El rotor también presenta poco hierro y su peso entonces es bajo. Finalmente se incluye en la Figura 7 el generador explosionado.

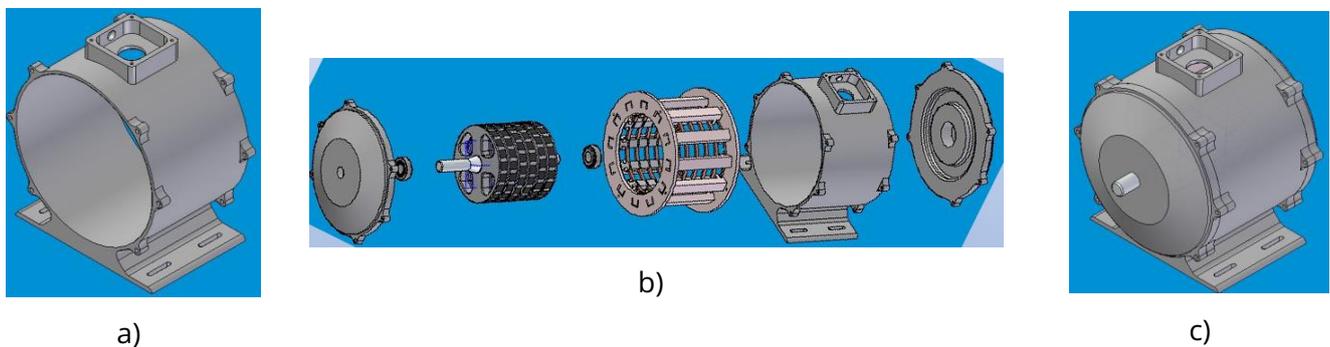


Figura 7: a) Carcasa (delrin) – b) máquina eléctrica explosionada y c) máquina eléctrica finalizada

A continuación, en una figura se verá la operación de la máquina eléctrica. El orden de la Figura 8 se ha diseñado de modo que la primera figura muestra el circuito magnético (Figura 6c)

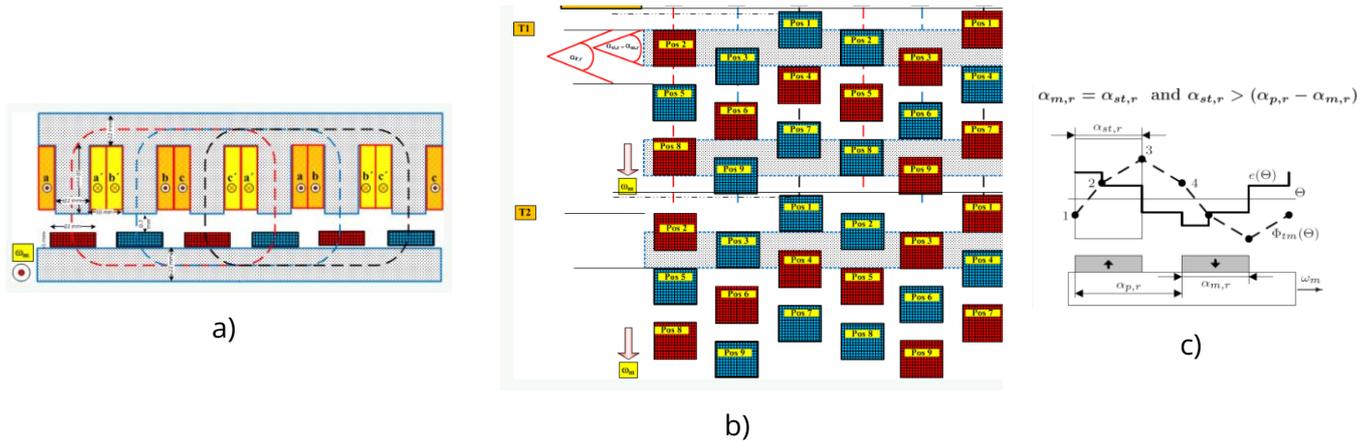


Figura 8: a) circuito magnético rotor-estator – b) rotor girando dentro del estator c) variación del flujo por el movimiento del rotor

### FUERZA DE ATRACCIÓN DE LOS IMANES CON LA CARCASA- FUERZA DE DESPEGUE

La ley de conservación de la energía establece que en un circuito RL, la potencia entregada por la fuente se distribuirá en parte en la resistencia y en el inductor ideal.

Dónde:

- 1- Es la energía por unidad de tiempo entregada por la fuente
- 2- Es la energía disipada por efecto joule en la unidad de tiempo
- 3- Es la energía por unidad de tiempo almacenada en un campo magnético

En el circuito eléctrico incluido en Figura 9 se ilustran los puntos mencionados en el párrafo anterior

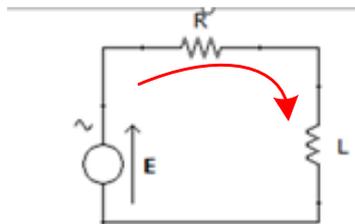


Figura 9: circuito eléctrico

$$E = iR + L \frac{di}{dt} \Rightarrow \overset{1}{Ei} = \overset{2}{i^2 R} + \overset{3}{L i \frac{di}{dt}} \dots \dots \dots (9)$$

Por lo tanto, la energía almacenada en un campo magnético será:

$$dU_B = L di \Rightarrow U_B = \int_0^i Li di = \frac{1}{2} Li^2 \dots \dots \dots (10)$$

Dónde L será:

$$L = n^2 P \left\langle \left( P \text{ (permeancia)} = \frac{\mu_0 A}{l} \right) \right\rangle \text{ por lo que } L = \frac{\mu_0 n^2 A}{l} \text{ (Wb/A} = \text{Henrio)} \dots \dots \dots (11)$$

Es así que:

$$U_B = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 n i^2 A}{l} \text{ y como } B = \frac{\mu_0 n i}{l} \Rightarrow F_B = \frac{1}{2} \frac{B^2 A}{\mu_0} \dots \dots \dots (12)$$

Considerando los valores usados en la máquina eléctrica diseñada, tendríamos:

Medidas del imán  $a=b=0,022$  m – la densidad de flujo del imán es  $B=1,338$  T – luego la fuerza según la ecuación anterior es:

$$F_s = \frac{1}{2} \frac{B_s^2 A_s}{\mu_0} \Rightarrow F_s = 35.156 \text{ (kgf)} \dots\dots\dots(13)$$

Esta fuerza es la máxima que se puede llegar a generar en condiciones especiales (considerando la inducción magnética uniforme en el entrehierro y despreciables las perdidas por corrientes parasitas e histéresis en el núcleo), y ocurre cuando el imán cubre todo el entrehierro, la fuerza real a la cual estará sometido el rotor es inferior.

Además del análisis de carga, el rotor se verá afectado por un ciclo de cargas que dependerá del número de polos y de las vueltas del mismo. Estas cargas dinámicas pueden ocasionar una falla por fatiga, la cual se deberá tener en cuenta en el diseño.

## Conclusión

Se ha elegido este tipo de diseño porque el objetivo es la construcción de un generador eléctrico que pueda utilizarse en aerogeneradores de eje horizontal o turbinas hidro cinéticas y que presente características de bajo peso y poco hierro. En el caso de aerogeneradores podría utilizarse para vientos medios entre 5 y 6 m/s a baja altura o movimiento de fluidos (agua de mar o río) de baja velocidad o densidad.

Bajo estas condiciones los siguientes aspectos del diseño deben destacarse:

1. El material magnético presenta características excelentes para este diseño y es de fabricación nacional.
2. El generador presenta las mejores condiciones de funcionamiento considerando fundamentalmente la elevada tensión y frecuencia de generación.
3. Debemos reconocer que presenta algunas dificultades para la disposición de los conductores en serie.
4. Se destaca el bajo peso del rotor.
5. La estructura y disposición del estator – rotor son muy originales y útiles considerando el tamaño y peso total de la máquina eléctrica.

## Referencias

Dmitry Svechkarenko, Licentiate Thesis Stockholm, Sweden 2007 “On Analytical Modeling and Design of a Novel Transverse Flux Generator for Offshore Wind Turbines”, - ISSN 1653-5146 - ISBN 978-91-7178-682-1 – KTH Electrical Engineering –

Jacek F. Gieras, Mitchell Wing, ISBN: 0-8247-0739-1 - 2002 by Marcel Dekker “Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications”

Santos J. Alfonso y Álvaro E. Pinilla Sepúlveda- 07/06/2005 - <http://hdl.handle.net/1992/224> Universidad de Los Andes Colombia “Adaptación de un generador electric de imanes permanentes y flujo radial”, -

Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper - ISBN 1-4020-26-67r ( HB) ISBN 1 - 4020-2720 – 6 (e – book) - 2004 Kluwer Academic Publis “Axial flux permanent magnet brushless machines”, hers.

Vorgelegt von - M.Sc. Mohammad S. Widyan - Doktor der Ingenieur - 03. Juli 2006 - Berlin 2006 “Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications”

Laboratorio Elettrofisico Engineering SRL Via G. Ferrari 14, 2005– 2014 Nerviano (MI) Italy “Hard and soft magnetic materials”

Dr. Ing. Prof. Mario Guillermo Macri, 2012, “Máquinas de Imanes Permanentes”, Universidad Nacional de Mar del Plata Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica



S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2005) “Principles of Electronic Materials and Devices”, Third Edition