

SIMULACION MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DE UNA MÁQUINA ASINCRÓNICA LINEAL DE FLUJO TRANSVERSAL

Cali – Colombia



RESUMEN

Este artículo describe la simulación de un modelo de máquina lineal de flujo transversal, empleando el método de análisis de elementos finitos por medio del software FLUX3D®. Este estudio abarca el análisis en estado estable y estático con el fin de poder cuantificar y cualificar el comportamiento eléctrico y magnético, al igual que fuerzas o empujes desarrollados en la máquina. Además, se proponen cambios desde el punto de vista constructivo y de configuración de la máquina con el fin de obtener mejoras en su desempeño y así optimizar su funcionamiento. El diseño y construcción fue realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, y el rediseño está siendo realizado por el grupo de investigación en conversión de energía Convergiá de la Universidad del Valle.

□ **JOSÉ LUIS OSLINGER G. Ing.**
Profesor Asistente
Escuela de Ingeniería
Eléctrica y Electrónica
Universidad del Valle
Cali – Colombia
oslinger@univalle.edu.co

□ **OSCAR ANDRÉS ALMONACID G. Ing.**
Escuela de Ingeniería Eléctrica y
Electrónica
Universidad del Valle
Cali – Colombia
oscandal@univalle.edu.co

*Grupo de Investigación en
Conversión de Energía CONVERGIÁ*
Universidad del Valle

PALABRAS CLAVES

Flujo transversal, máquina lineal, elementos finitos.

ABSTRACT

This paper describes the simulation of a transverse flux linear machine's model, using FLUX3D®, a Finite Elements Analysis computer program. This study includes a static and steady state analysis in order to calculate the electromagnetic behavior, such as forces developed in the machine. Besides, changes from the constructive and configuration machine's point of view were proposed, in order to improve its performance and thus, to optimize its operation. The design and construction were made by the Universidad Politécnica de Madrid (Spain) and the redesign is being made by the Research Group in Energy Conversion – CONVERGIA, from Universidad del Valle.

KEYWORDS

Transverse flux, linear machine, finite elements.

1. INTRODUCCIÓN

E. R. Laithwaite planteó el uso del flujo transversal como campo principal en las máquinas lineales empleadas en trenes de levitación magnética. A partir de sus estudios en laboratorio [2], se comenzó el desarrollo de prototipos rotativos para ser empleados en motores de alta tracción.

La experiencia obtenida con el desarrollo de tecnologías de motores lineales de alta velocidad [3], [4], ha suministrado los conocimientos necesarios que dan lugar a las Máquinas de Flujo Transversal o MFT, en las cuales el circuito magnético se rota con respecto al circuito eléctrico un ángulo recto, de tal manera que las líneas de campo atraviesan en un plano normal la línea de desplazamiento o movimiento como se observa en la figura 1.

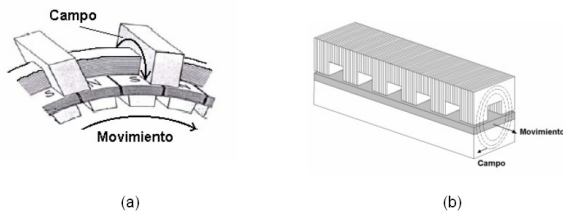


Figura 1. Concepto de Flujo Transversal:
a) Rotativo, b) Lineal

A medida que se proponían nuevos modelos, diferentes investigadores emplearon la técnica de análisis mediante elementos finitos AEF, como herramienta en le mejoramiento de los diseños [3], [5], [6].

Este artículo muestra los resultados obtenidos del análisis por medio del Método de los Elementos Finitos MEF a un prototipo de motor lineal de flujo transversal diseñado y construido en la Escuela Superior Técnica de Ingenieros Industriales ESTII de la Universidad Politécnica de Madrid UPM, denominado Máquina Asíncrona Lineal de Flujo Transversal (MALFT) cuyas características de diseño le permiten incluirlo entre la categoría de máquina de flujo transversal [1]. En la figura 2 se observa la ubicación de las bobinas y de los núcleos ferromagnéticos (primario); al igual que la lámina de aluminio en la parte superior (secundario), esta última transparente para poder observar el arreglo de chapas y el devanado.

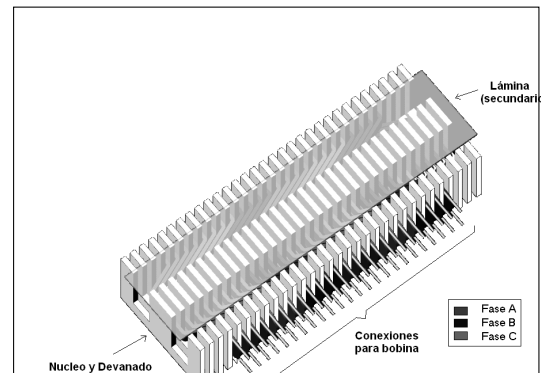


Figura 2. Modelo Físico de Máquina Asíncrona Lineal de Flujo Transversal

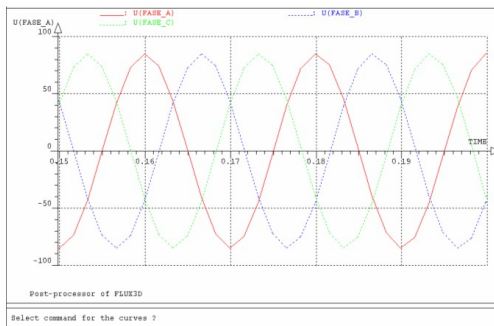
2. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

Como un primer paso en estudio para el desarrollo de máquinas lineales del tipo de flujo transversal, el prototipo de MALFT sometido a la prueba en régimen estático, permitió obtener datos de voltaje, corriente, factor de potencia, densidad de flujo y empujes o fuerzas desarrolladas en el secundario [1]. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con los datos de las pruebas en laboratorio. La tabla 1 muestra los resultados para la corriente y el factor de potencia. La

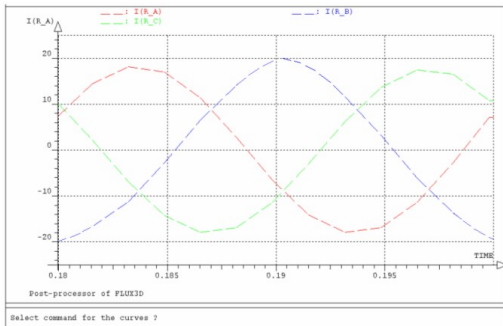
figura 3 muestra las curvas de tensión y corriente.

Tabla 1. Corriente y Factor de Potencia. Obtenidos con el M.E.F y los datos de laboratorio.

Fase	Voltaje [V]	Corriente [A]			Cos ϕ		
		Laboratorio r.m.s	M.E.F	% Error	Laboratorio	M.E.F	% Error
A	60	13.7	12.91	5.77	0.316	0.305	3.48
B	60	15.5	14.19	8.45	0.335	0.333	0.6
C	60	13.9	13.01	6.40	0.395	0.399	1.01



(a)



(b)

Figura 3. Graficas de Tensión y Corriente en la MALFT

El empuje obtenido se comparo con los resultados de laboratorio los cuales fueron tomados empleando galgas dinamométricas. En el laboratorio se fijo la lámina de tal manera que las galgas pudieran medir el empuje en dos de los ejes: Empuje vertical (F_z) y el empuje horizontal (F_y). Los resultados de empuje se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Empujes en la Lámina de Aluminio. Resultados del M.E.F y los datos de laboratorio

Empujes en Newton [N]								
F_x			F_y			F_z		
Laboratorio	M.E.F	%Error	Laboratorio	M.E.F	%Error	Laboratorio	M.E.F	%Error
-	4.2*	-	8.08	7.3	9.65	13.54	14.6	7.82

3.1. Circuito Magnético

El núcleo de la MALFT esta constituido por chapas en forma de E en las cuales se aloja el devanado. El flujo magnético, tiende a concentrarse en el interior de las ranuras, por lo cual serán estas partes las que tiendan a saturarse primero. Este fenómeno se presenta durante la prueba y se analiza con la simulación. La figura 4 muestra la concentración de flujo en los bordes internos de las ranuras. Los círculos rojos a trazos encierran los bordes inferiores externos e intermedios del la chapa. En la misma figura 4 se observa la carta de colores indicando el nivel de densidad presente. Se puede ver que en los vértices internos se puede alcanzar $B_{max} = 1.6 T$

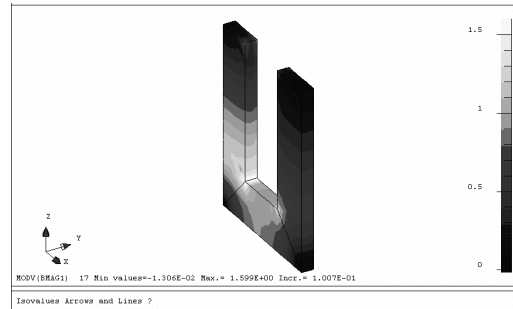


Figura 4. Densidad de Flujo Magnético $B[T]$ – Valor Máximo. Para una chapa del núcleo ferromagnético.

Esta concentración de campo magnético en los bordes conlleva a que se desmejoren las condiciones de arranque del motor debido a la saturación de los caminos de dispersión, incrementando la corriente de arranque.

Cada núcleo al estar desacoplado crea espacios (ranuras longitudinales) las cuales se asemejan a ranuras de profundidad casi infinita. Esto origina una distribución de campo magnético no uniforme en el entrehierro con alto contenidos de armónicos. Se puede observar en la figura 5 la distribución del campo en el entrehierro dada la concentración y su forma.

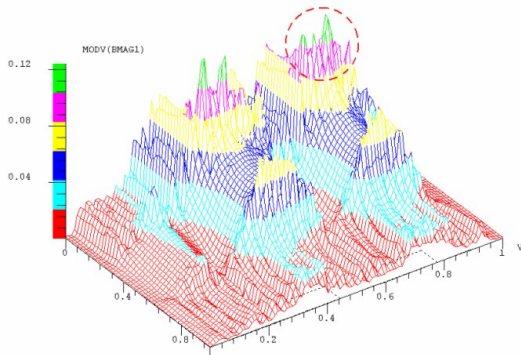


Figura 5. Distribución de Densidad de Campo en el Entrehierro.

3.1. Devanado

El devanado de la máquina lineal tiene un principio y un fin, por lo cual se crea el llamado efecto borde, en el cual la onda de fuerza magnetomotriz se ve afectada en los extremos del devanado. En este caso, la onda de fuerza magnetomotriz deja de ser periódica ya que dependiendo de la corriente que circule por las bobinas que se encuentren en los extremos, así mismo se conformara la onda magnetizante.

En el caso de la MALFT, dependiendo del valor instantáneo de corriente en cada fase, la onda de f.m.m. variara en el tiempo y conllevara a que en distintos instantes se presente un alto contenido de armónicos pares e impares. Por ejemplo, en la figura 6, se observa la presencia de un armónico de segundo orden o de secuencia inversa al movimiento del motor para un intervalo de 0 a 5 ms (recordando que el periodo para 50 Hz es $t = 20$ ms).

El armónico segundo por ende creara momentos parásitos que conllevan a aumento en las pérdidas en la máquina.

En este tiempo la onda se deforma debido al efecto borde. Como se ve en las figuras 6a y 6c, este efecto tiende a crear un tercer polo para la configuración actual.

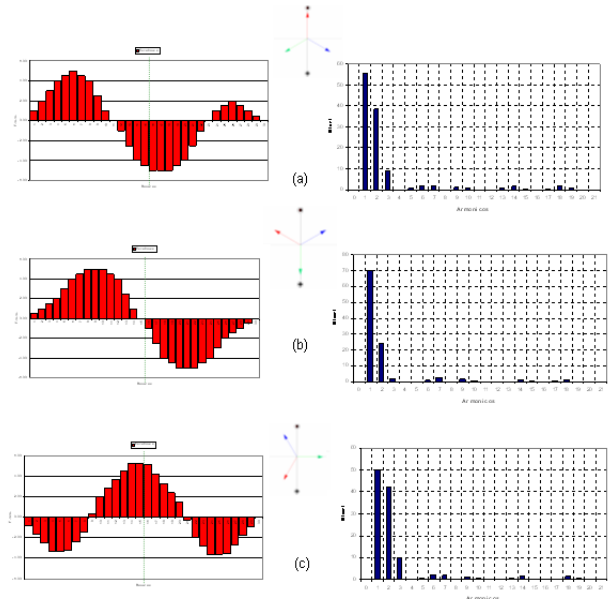


Figura 6. Escalones de F.M.M y Nivel de Armónicos Presentes. a) $t = 0$ ms, b) $t = 3$ ms, c) $t = 5$ ms

4. PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO

Teniendo en cuenta lo observado en el análisis anterior, y con el fin de atenuar y evitar la saturación del circuito magnético, y la asimetría presente en la f.m.m, se pretende proponer cambios constructivos y de configuración que permitan:

- Eliminar los bordes inferiores externos e intermedios de la chapa, teniendo en cuenta el no dejar ángulos $\leq 90^\circ$
- Troquelar en forma de curvas (sin ángulos) las ranuras de cada chapa.
- Acercar el devanado al entrehierro, es decir acortar la altura de los dientes.
- Redistribuir el devanado con el fin de atenuar la cantidad de armónicos de f.m.m presentes en la máquina.

Se tienen en cuenta dos parámetros importantes a tener en cuenta para el mejoramiento: El empuje, y el factor de potencia. Por lo tanto estos parámetros son pieza clave en la consecución de un modelo mejorado de MALFT.

En una primera instancia, se modificó solo el núcleo ferromagnético sin alterar el devanado para poder determinar los efectos en la modificación del circuito magnético. En una segunda etapa se analizó el comportamiento de

diferentes configuraciones de devanados y así estimar su influencia en el comportamiento de la MALFT.

4.1. Circuito Magnético

Aprovechando el material y dimensiones actuales de las chapas, se propone eliminar los ángulos rectos de los bordes internos de ranura para atenuar el efecto de saturación en los mismos y se acerca el devanado al entrehierro, acortando los dientes de las chapas. Además, al reducir la altura de los dientes, se reduce el peso a la máquina y se tiene menos material a magnetizar, por lo cual se disminuye la corriente de alimentación.

El modelo original de MALFT esta constituido solamente por un primario (núcleos + devanado) y un secundario (lámina de aluminio). Se propone incluir un núcleo ferromagnético en la parte superior de la lámina con el fin de simular parte de un riel de vía y que puede ser utilizado para el mejoramiento del circuito magnético. Si el flujo tiene un mejor camino de circulación, la corriente disminuirá y mejorara el factor de potencia. La figura 7 muestra el corte transversal de la disposición de la MALTF con núcleo secundario.

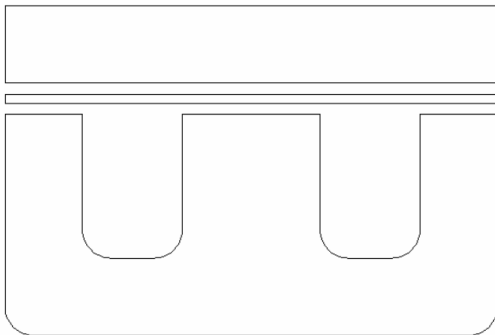


Figura 7. Corte Transversal de la Disposición del Nuevo Modelo con Núcleo Secundario.

4.2. Devanado

Como se observa en la MALFT, existe una asimetría debido al efecto borde ocasionado por el devanado de la máquina.

La distribución del devanado, el número de bobinas por polo y fase, al igual que el número de fases, influye en la presencia de armónicos

de f.m.m y en especial si se tienen en cuenta la no periodicidad de la onda.

Analizando la factibilidad en la reducción de armónicos sin deteriorar la amplitud de onda de f.m.m, se propone un devanado de $q = 5$, $2p = 2$ y $un = 5$, rediseñando por lo tanto las bobinas, pero sin modificar ostensiblemente la resistencia ohmica vista por cada fase.

La figura 8a muestra el arreglo propuesto y la figura 8b el nivel de armónicos existentes para un determinado periodo de tiempo. El tiempo tomado corresponde a $t = 5$ ms, que es el mas critico de los anteriormente analizados.

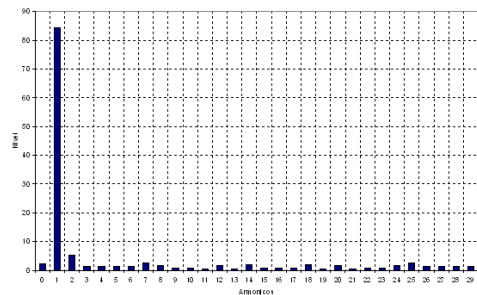


Figura 8. Devanado Propuesto $Z = 35$. a) Arreglo de conductores b) Amplitud de armónicos para $t = 5$ ms.

Teniendo en cuenta la información reunida y el anterior análisis, la tabla 3 describe 4 modelos para la simulación y posterior comparación con el diseño original. Para facilitar su mención, se emplea una abreviatura para cada modelo.

Tabla 3. Modelos de MALFT Propuestos.

Modelo	Abreviatura
MALFT con núcleo reducido y devanado original	MNR
MALFT con núcleo reducido, devanado original y núcleo secundario	MNR_NS
MALFT con núcleo reducido y devanado con $q = 5$	MNR_Q5
MALFT con núcleo reducido, devanado de $q = 5$ y núcleo secundario.	MNR_Q5_NS

Núcleo reducido se refiere al acortamiento en la altura de los dientes y al redondeo de los borde de ranura y de la base de la chapa.

5. RESULTADOS

Con el fin de mantener en lo posible constante la carga lineal, es decir sin variar la corriente, la reducción en la altura de los dientes conlleva a la disminución de la tensión de alimentación de la máquina. Inicialmente se simuló el modelo MNR a tensión de ensayo, con lo cual se obtuvieron corrientes de aproximadamente el 110% por encima del valor obtenido con el modelo original. Teniendo en cuenta este resultado, se alimentó el circuito acoplado al modelo con la mitad del nivel de tensión original. Este mismo valor se utilizó para los otros modelos. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos para corrientes, factor de potencia y empujes en cada uno de los modelos.

Tabla 4. Corrientes y Factores de Potencia para cada modelo

Modelo	Tensión [V]	Corrientes [A]			Factor de Potencia			Empujes [N]	
		I_a	I_b	I_c	$\cos \Phi_a$	$\cos \Phi_b$	$\cos \Phi_c$	F_y	F_z
MALFT original	60	12.91	14.19	13.01	0.305	0.333	0.399	7.3	14.6
MNR	30	12.72	12.71	12.37	0.580	0.550	0.570	7.8	16.2
MNR_NS	30	12.71	12.70	12.35	0.650	0.620	0.620	13.1	22.4
MNR_Q5	30	13.10	13.09	13.10	0.580	0.578	0.578	6.1	16.4
MNR_Q5_NS	30	12.60	12.58	12.60	0.660	0.650	0.660	14.2	22.0

■ Datos del modelo original

Dada la reducción de la tensión y la consecución de un mejor factor de potencia se mejora la eficiencia en el arranque de la máquina.

Al reducir la altura de la chapa magnética y el redondeo de los bordes internos de ranura se obtuvieron densidades de campo magnético, por debajo de los valores obtenidos en el modelo original. La figura 9 muestra los niveles de densidad de campo para el mismo instante de tiempo en cada modelo.

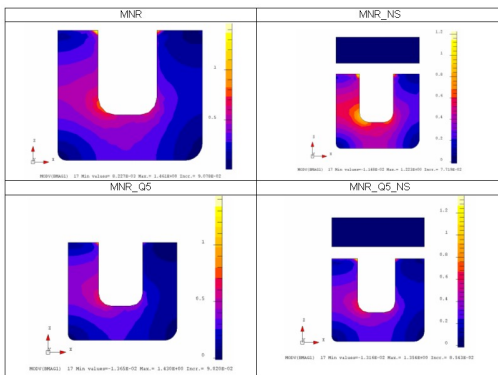


Figura 9. Densidades de Flujo Magnético B [T] en los Núcleos de los Modelos Propuestos

Al eliminar los ángulos rectos del interior de ranura, se eliminó los efectos de la saturación en

el borde, con lo que se atenuó el efecto en dichas zonas.

Como se observa en la figura 5, la distribución de campo en el entrehierro es desigual, presenta alteraciones en toda la periferia del entrehierro. Para los modelos propuestos la distribución en la densidad de flujo magnético no presenta mejora significativa ya que, debido a la naturaleza del diseño (núcleos desacoplados), la combinación con un devanado convencional y los espacios existentes entre las chapas; se presentan espacios que alteran la distribución de campo en el entrehierro. La figura 10 muestra las ondas de campo para cada caso.

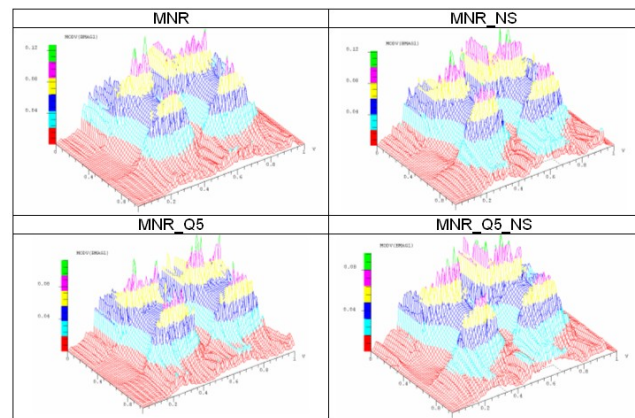


Figura 10. Distribución de la Densidad de Flujo Magnético B [T]. Un mismo instante de tiempo.

6. CONCLUSIONES

La Máquina Asíncrona Lineal de Flujo Transversal (MALFT) es un prototipo sencillo pero con características particulares que la convierten en un modelo innovador y que puede tener etapas de desarrollo posteriores. Es necesario desarrollar pruebas dinámicas con el modelo MALFT de la ESTII, las cuales permitan obtener un estudio completo del funcionamiento y operación de la máquina.

El prototipo MALFT de la ESTII tiene un valor de factor de potencia muy por debajo de un valor mínimo requerido para un funcionamiento normal. Aunque las máquinas de flujo transversal tienen esta característica, este modelo está por debajo de los valores normales para las MFT que oscilan entre 0.4 y 0.6.

Se logro mejorar la eficiencia durante el arranque de la máquina dado que en los cuatro casos analizados se redujo el valor de tensión aplicada, obtenido igual o mayor empuje en la lámina de aluminio y mejorando el factor de potencia con respecto al original.

La utilización de un núcleo secundario mejora el empuje, aunque se puede influir en el costo de construcción de la vía. Debido al mejoramiento en la reluctancia del sistema, se mejoro el factor de potencia a casi el doble del valor original. La densidad de flujo en el núcleo secundario es mínima comparada con los valores existentes en las chapas del núcleo primario.

Eliminar los ángulos rectos en el interior de las ranuras mejora ostensiblemente los niveles de saturación en el núcleo magnético. Esto se refleja en el mejoramiento de la eficiencia del sistema y por ende a la reducción de la temperatura durante los arranques y sobrecargas de la máquina. También se reducen las perdidas en el núcleo ferromagnético.

El efecto borde se pronuncia más en el devanado de dos polos de la MALFT. Este efecto es inherente en las máquinas lineales y debe ser atenuado con el fin de evitar la aparición de grandes cantidades de armónicos pares en la fuerza magnetomotriz. Al utilizar un mayor número de polos el efecto borde se hace menos evidente, aunque se ve descompensado con la disminución en la amplitud de f.m.m.

La distribución de densidad de flujo magnético en el entrehierro no mejoró con los modelos propuestos esto debido a la presencia permanente de grandes espacios entre los núcleos.

Referencias

- [1] A. M. Alonso. *Máquina Asíncrona Lineal de Flujo Transversal*. Informe de pruebas y mediciones en laboratorio. 1999.
- [2] E. R. Laithwaite, J. F. Eastman. *Linear Motors With Transverse Flux*. IEE Vol. 118. No. 12, Diciembre de 1971
- [3] P. Anpalaham. *Design of Transverse Flux Machines Using Analytical Calculations & Finite Element Analysis*, Tech. Licentiate

Thesis. Royal Institute of Technology, Stocolmo, 2001.

- [4] B. E. Hasubek. *Analysis and Design of Passive Rotor Transverse Flux Machines with Permanent Magnets on the Stator*. Department of Electrical and Computer Engennering. Calgary Alberta. 2000.
- [5] R. Blissenbach, G. Henneberger. *New Design of a Transverse Flux Machine for a Wheel Hub Motor in a Tram*. Aachen Institute of Technology (RWTH).
- [6] R. Blissenbach, G. Henneberger. *New Design of a Soft Magnetic Composite Transverse Flux Machine with Special Attention on the Loss Mechanisms*. Aachen Institute of Technology (RWTH).

AUTORES



José Luis Oslinger Gutiérrez.

Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 1996. Profesor de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle. Candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle.

Ha sido profesor invitado al ETSII de la Universidad Politécnica d Madrid (2000 y 2003). Su area de trabajo es la teoría, diseño, diagnóstico en sitio, mantenimiento y modelamiento de máquinas eléctricas rotativas y lineales. oslinger@univalle.edu.co



Oscar Andrés Almonacid G.

Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 2004. Auxiliar de Investigación del Grupo en Investigación en Conversión de Energía CONVERGÍA. Estudiante de Maestría en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica. oscandal@hotmail.com