Nuevos materiales magnéticos inducen innovaciones en los diseños tradicionales de máquinas eléctricas, el caso de la máquina Written Pole (Polos Impresos)

Massa, Pablo Carmelo
Prado Iratchet , Susana
Pinzón Montes, Andrea
Agotegaray, Juan Carlos
Ferreyra Aicardi, Fabiana
Véliz, Maximiliano

Documento de trabajo

DT IDEI 2 -2017

UNGS - IDEI

Publicaciones IDEI
Documentos de trabajo

IDEI Instituto de Industria
Universidad Nacional de General Sarmiento

http://www.ungs.edu.ar/ms_idei/publicaciones/

Nuevos materiales magnéticos inducen innovaciones en los diseños tradicionales de máquinas eléctricas, el caso de la máquina Written Pole (Polos Impresos)

24/10/2017

Massa, Pablo Carmelo [1]
Prado Iratchet , Susana
Pinzón Montes, Andrea
Agotegaray, Juan Carlos
Ferreyra Aicardi, Fabiana[2]
Véliz, Maximiliano

IDEI

Automatización y aplicaciones mecatrónicas en áreas de la manufactura

pacmassa@hotmail

miratchet@ungs.edu.ar

apinzon@ungs.edu.ar

jagotega@ungs.edu.ar

fferreir@gmail.com

[Abstract: En este documento se presenta el análisis sobre la máquina eléctrica Written-Pole®, realizado en el marco del proyecto de investigación "Nuevas Tecnologías empleadas para mejorar la eficiencia de la conversión de energía", desarrollado en la UNGS entre los años 2011 y 2013.

Iniciamos el proyecto con el propósito de estudiar el grado de factibilidad de uso en la Argentina y sus posibles aplicaciones en el ámbito rural e industrial.

La máquina eléctrica Written-Pole®, llamada en español Polos Impresos, fue desarrollada a pedido del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI, Electric Power Research Institute) en los Estados Unidos (USA), por la empresa Precise Power Corporation (PPC).

El estudio comenzó planteando los siguientes interrogantes:

¿Qué particularidad tiene en su diseño esta máquina capaz de cambiar el número de polos mientras su velocidad mecánica varía?

¿Cómo está construida?

¿Cómo modelarla matemáticamente para simular/predecir su comportamiento en estado dinámico?

¿Esta máquina, en su modo monofásico puede ser una solución aceptable para zonas rurales donde se necesite el bombeo, en la Argentina?

¿Puede tener aplicaciones en casos particulares en nuestra industria, como por ejemplo en la extracción de petróleo?

¿Se puede aplicar esta máquina en su modo trifásico para la generación con energías alternativas con mayor éxito que las máquinas convencionales dadas sus excelentes características de estabilidad y de calidad en la generación?

¿Es la innovadora máquina de polos impresos tan eficiente y tan buena en su operación como dice el fabricante?

A continuación se muestra el estudio realizado, iniciando con un marco teórico, luego la descripción de la tecnología de Written-Pole®, la descripción pormenorizada de su funcionamiento y de sus curvas características. Además, se agrega la propuesta de un modelo matemático del funcionamiento dinámico de la máquina que permite la simulación.

]

[Palabras clave: calidad eléctrica, eficiencia energética, polos impresos

[1] Ingeniero Electricista, Diplomado en Administración de la Tecnología. Fue Profesor Titular del Área de Máquinas, Dispositivos e Instalaciones Eléctricas perteneciente al Departamento de Electrotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNLP y Director del laboratorio de investigación y desarrollo LEDE-SIECIT. Se desempeñó como Decano de la Facultad de Ingeniería de la UNLP en los años: 1992 a 1995, 2004 a 2007 y 2007 a 2010.
[2] Directora del Departamento de Electrotecnia , FIUBA . Docente de Electrotecnia general y Control Industrial Distribuido en la FIUBA . Docente de la carrera de especialización en Automatización Industrial . Especialista en Docencia en Entornos virtuales (universidad Nacional de Quilmes). Codirectora Proyecto UBACYT interdisciplinario : Estrategias de Eficiencia Energética y Energías Renovables en edificación y su aporte ambiental, económico y social al desarrollo sustentable.

1. MARCO TEÓRICO

Las máquinas eléctricas funcionan con el principio de conversión electromagnética. La transformación de energía eléctrica a mecánica o viceversa se realiza dentro de un medio magnético. La energía eléctrica genera campo magnético y es ese campo magnético, luego de cubrir sus pérdidas, el que origina movimientos mecánicos constituyendo el motor eléctrico. Las máquinas eléctricas son duales, por lo que la energía mecánica aplicada apropiadamente produce un campo magnético que origina energía eléctrica y es el caso del generador eléctrico.

Las máquinas denominadas rotativas las podemos dividir en tres grandes grupos: las sincrónicas, las asincrónicas y las de corriente continua. Todas se basan en la Ley de Faraday-Lenz:

$$V = -\frac{d\emptyset}{dt}; \qquad \oint \vec{E}.d\vec{l} = \iint_1^2 (\vec{v}.\vec{B}).d\vec{l}\,; \qquad \nabla x\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (1)$$

Las máquinas eléctricas se encuentran en todas aquellas aplicaciones que requieran trabajo mecánico, tanto industrial como en el hogar, y en la generación de energía en los sistemas de suministro eléctrico. Según B.C. Mecrow y A.G. Jack [1] de toda la energía generada en el mundo, la mitad se consume en alimentar los motores que existen. Dado que estos tienen pérdidas, la energía que se produce en esas pérdidas es energía que no usa el consumidor, por lo cual lograr reducir las pérdidas de dichos motores o aumentar su eficiencia implicaría un impacto grande en la reducción de los consumos efectivos, quedando así una mayor cuota de energía disponible para satisfacer la demanda, sin necesidad de generar más energía. De allí la importancia que tiene cualquier mejora que se realice en el diseño y en el empleo de nuevos materiales magnéticos. Estas ferritas que se están empleando en la construcción de las máquinas actuales tienen un alto valor de campo magnético y menores pérdidas magnéticas por lo que hay un crecimiento de la eficiencia. Esto a nivel global repercutirá en un ahorro energético de todo el sistema de suministro de energía eléctrica. El EPRI estima que la aplicación de estas tecnologías podría implicar ahorros arriba del 10% a nivel mundial [2].

Las máquinas eléctricas siempre se han considerado que son altamente eficientes, por eso la tecnología se orientó mayormente en reducir los costos de la electrónica de potencia de los accionadores de velocidad y en mejorar los variadores de velocidad.

Con el advenimiento de nuevos materiales se ha producido un avance notable en los últimos años en el diseño de las máquinas eléctricas. Tanto los nuevos aceros eléctricos como los imanes permanentes de tierras raras proporcionan flujo magnético "sin pérdidas". Se han renovado los métodos de construcción de las máquinas, como es el caso de los bobinados donde se han reducido las pérdidas. Se puede concluir que hay una tendencia creciente a aumentar la eficiencia de las máquinas eléctricas.

Dado que para las grandes máquinas eléctricas la eficiencia ya es alta de por sí las mejoras no tienen el mismo impacto que en las máquinas más pequeñas, donde sus rendimientos son bajos. Agregado a que los motores monofásicos de inducción de 240V su operación ya no es práctica por arriba de los 11,77 kW porque toman una corriente muy alta en el arranque, con el agregado de que son muy costosos.

Los motores monofásicos estándares necesitan una muy alta corriente de arranque, seis a nueve veces su corriente nominal, sumado a un bajo factor de potencia (cos ϕ) y pérdidas por calentamiento, por lo que se los fabrica solo hasta 30HP. Potencia que ha quedado desactualizada frente a exigencias de algunas aplicaciones como el riego, extracción de agua, las perforaciones de petróleo, entre otras.

En la década de 1990, con el apoyo del EPRI, Precise Power Corporation (PPC) de Bradenton, la Florida, desarrolló un nuevo concepto en máquinas eléctricos llamada la máquina eléctrica Written-Pole® [3].

La tecnología denominada Written Pole ® (Polos Impresos) se emplea en máquinas eléctricas tanto para generadores como para motores, monofásicos o trifásicos. Donde ésta tecnología produjo una mejora relevante fue en el motor monofásico.

La máquina de Polos Impresos (Written-Pole®) desarrollada con la Tecnología de Written Pole® fue nominada en 1994 por R&D 100 Award from R&D Magazine como uno de los 100 productos tecnológicamente más importantes de ese año en los Estados Unidos de América (EE.UU.). En 1995 [6] John Roesel de PPC presenta en sociedad esta máquina eléctrica con innovaciones en el rotor y el estator. En 1997 gana el Premio a Productos Nuevos de la Sociedad Nacional de Profesionales Ingenieros en EE.UU., que lo elogia "por su uso innovador de principios de ingeniería y de materiales y su beneficio general para la sociedad".

Las características de los motores monofásicos de Polos Impresos (Written-Pole®) son: baja corriente de arranque, alta eficiencia, confiable, sincrónica, arranca cargas de gran inercia, se restablece luego de breves interrupciones de potencia, re-arranca en breve tiempo, bajas armónicas en la entrada, factor de potencia alto durante el arranque, alto par de arranque por Ampere, diseño simple sin bobinas rotantes, cupla constante con arranque suave, opera en todo el rango de tensiones y tolera desequilibrio de tensión de fase, entre otras.

Debido a que un motor monofásico de polos impresos tiene menor corriente de arranque que un motor monofásico convencional puede tardar más en llegar a su velocidad de régimen, mientras un motor convencional llega a su velocidad nominal en cuestión de segundos para evitar el sobrecalentamiento. Esta lentitud en la puesta en marcha es beneficiosa en el caso de las bombas, puesto que si la velocidad es lenta se puede evitar los golpes de ariete caso muy frecuente en las máquinas convencionales. Se han podido fabricar motores monofásicos Written Pole® de hasta 100HP, mientras que el valor máximo es de 10HP de las máquinas convencionales.

El diseño básico de una máquina de Polos Impresos es que el campo *magnético en el rotor puede cambiarse a medida que gira la máquina. Este cambio continuo del número de polos en el rotor permite a la máquina que la velocidad (r.p.m.) y la frecuencia (f) sean independientes porque el* número *de polos es variable y se controla electrónicamente.*

Este diseño abre las puertas para la construcción de máquinas con nuevos enfoques, con ventajas relevantes en el motor monofásico (Written-Pole®) para potencias mayores a los 10HP y como

generación en trifásica (Grupo Motor Generador Roesel) en la generación distribuida, impactando directamente en el ahorro energético y en la calidad de energía. Luego de 20 años su uso se ha extendido en Estados Unidos y Canadá, promocionada por las empresas de energía, y en Corea, Irán y Brasil se está analizando emplearla como alternativa válida para explotaciones rurales.

2. TECNOLOGÍA DE POLOS IMPRESOS

Los motores monofásicos están limitados a aplicaciones que requieran menos de 10HP debido a que su corriente de arranque puede alcanzar entre 6 a 10 veces la corriente nominal. Aún los motores de alta eficiencia bajo la norma IEC 60034-30 tienden a tener una corriente de arranque que es 10 veces la corriente asignada. Estas altas corrientes elevan la temperatura del rotor, y pueden provocar huecos de tensión o sobretensiones en el suministro eléctrico, e incluso generar armónicas en la red.

En 1995 John Roesel de PPC presenta en sociedad esta máquina eléctrica con innovaciones en el rotor y el estator. El rotor de esta máquina está diseñado combinando los rotores de las máquinas de histéresis, de inducción y sincrónica con imán permanente. Posee una capa continua de material magnético de ferrita de alta anisotropía en la dirección orientada del campo, similar al material utilizado en máquinas sincrónicas. La jaula de acero laminado es de alta resistencia, ofreciendo así una importante limitación de la corriente de arranque. En el arranque presenta un factor de potencia cercano a la unidad. Cuando la máquina está en régimen normal su funcionamiento es similar al de la máquina sincrónica y no circulan las corrientes inducidas en las barras de la jaula por lo que disminuyen drásticamente las pérdidas reflejándose en un aumento del rendimiento [4].

El motor monofásico de Polos Impresos puede tener el rotor interno o externo, como se muestra en la figura 1 y 2. Muchos de los motores de Polos impresos disponen de un rotor externo que gira alrededor de un estator interior, opuesto a los motores convencionales.

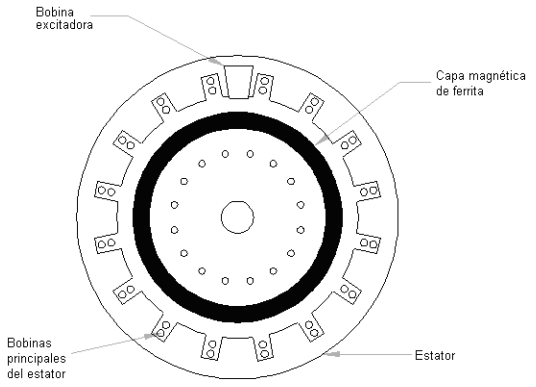

Figura 1. Diagrama de la máquina de Polos impresos (Written-Pole®) con rotor interno.

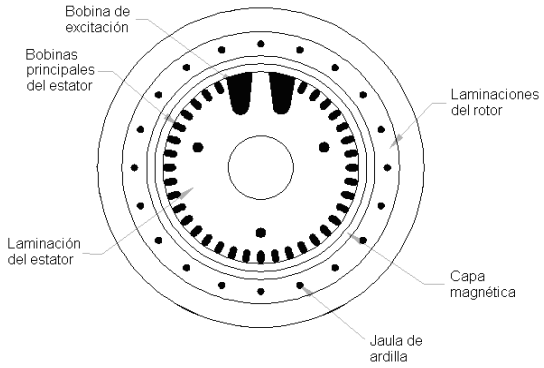

Figura 2. Diagrama del motor de Polos impresos (Written-Pole®) con rotor externo.

La característica distintiva de las máquinas de Polos Impresos es el uso de una bobina de excitación concentrada ubicada en uno o dos puntos en el estator, que se diseña para producir un campo magnético lo suficientemente grande como para magnetizar el rotor. Esta bobina se enciende electrónicamente imprimiendo polos temporales sobre la capa de imanes semipermeables dispuestos en el rotor.

2.1. Constitución del Rotor

El rotor, mostrado en la figura 3, es tipo jaula de ardilla donde las barras son de acero laminado de alta resistencia que reduce la corriente de arranque a 1/6 de las máquinas convencionales. Está recubierta por una capa continua de material magnético de ferrita $S_rOnFe_2O_3$ de alta anisotropía en la dirección orientada del campo y su espesor varía de 15 a 30 mm dependiendo del tamaño de la máquina, sobre la superficie del rotor de chapas laminadas. Necesitando para magnetizar o re-magnetizar el campo magnético (B) valores muy pequeños de intensidad del campo magnético (H) (por ende de la corriente). La composición exacta es propiedad de PPC.

El material de ferrita utilizado en el rotor es similar al material magnético de los motores sincrónicos, lo que permite mantener su magnetización en todo el rango de operación. Las propiedades magnéticas de este material propietario permiten que se reduzca la intensidad del campo magnético (H) necesario para magnetizar o reorientar el campo magnético (B) en el material mientras el rotor está girando. Esto se logra sin perder las propiedades necesarias para el funcionamiento normal y tiene además el beneficio de aumentar la magnitud de la cupla de histéresis disponible en el arranque.

El rotor puede estar dispuesto externamente girando alrededor de un estator interior, opuesto a los motores convencionales, esta estructura invertida crea un efecto de inercia en el volante que le permite soportar perturbaciones de la calidad de la energía, por interrupciones momentáneas de la tensión de hasta 15 segundos [4][5].

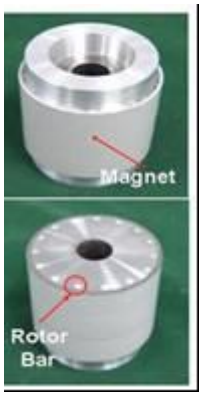

Figura 3. Rotor interno máquina de Polos Impresos.

2.2. Constitución del Estator

El estator de este motor es muy similar a un motor de inducción típico formado por chapas laminadas. Estas chapas son de acero de bajas pérdidas eléctricas. Los bobinados son similares tanto en diseño como en función a los utilizados en un motor de inducción o sincrónico

convencional. La característica distintiva del motor de Polos Impresos (Written-Pole®) es el uso de una bobina de excitación concentrada ubicada entre las bobinas principales del estator, como se muestra en la figura 4. La bobina de excitación se diseña para producir un campo magnético potente lo suficientemente grande como para magnetizar totalmente la parte magnética del rotor a la frecuencia de red [5][6]. Se enciende electrónicamente imprimiendo polos temporales sobre la capa de imanes semipermeables dispuestos en el rotor a medida que el rotor gira, como la velocidad de la máquina va variando, el número de polos no es constante pudiendo ser impar e incluso fraccionario.

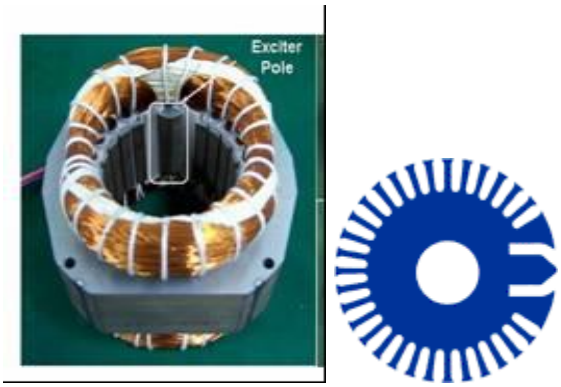

Figura 4. Estator con la bobina adicional (polo excitador).

3. FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA WRITTEN-POLE®

En la teoría clásica el requisito para obtener salidas equilibradas en las máquinas es que "el número de pares de polos magnéticos debe ser igual para el rotor y el estator", la desviación de este principio produce una máquina inestable. La máquina con la Tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®), parece contradecir este principio, el número de polos que se imprimen en el rotor se correlacionan con su velocidad mecánica pudiendo en una vuelta ser impar e incluso fraccionario siempre que se cumpla la Ec. (2), como se muestra en la tabla 1. Esta máquina es estable porque los polos temporarios que se imprimen en el rotor le permiten al motor desarrollar una cupla sincrónica, Ec. (3).

$$\boxed{f_s = \frac{P.n_r}{120}[Hz]} \quad (2)$$

Donde f_s= frecuencia del estator, P= número de polos, n_r= velocidad mecánica del rotor.

$$Te = K \times \Phi sr \times F \times sen\delta, \quad (3)$$

Donde Te= cupla electromagnética, F= valor eficaz de la onda de FMM del inductor, Φsr= valor eficaz del flujo neto por polo que atraviesa el entrehierro.

Cuando el motor de Polos Impresos alcanza aproximadamente el 80% de su velocidad sincrónica, se conecta la bobina de excitación adicional en el estator imprimiendo polos en la capa de imanes semipermeables del rotor [10]. Estos polos impresos temporarios le permiten al motor desarrollar un más alto par cuando se aproxima a su velocidad sincrónica. Al alcanzar la velocidad nominal, se

desactiva la bobina de excitación quedando la máquina funcionando como máquina sincrónica. Si por alguna contingencia, debida a fluctuaciones en la energía de alimentación o a variaciones en la carga, la velocidad retórica decae, el sistema automáticamente reinicia la impresión para mantener la salida constante [5].

Dada su baja corriente de arranque este motor arranca a tensión plena y con carga máxima sin ocasionar calentamiento. Además ante una falla momentánea que lo saca de servicio puede re-arrancar fácilmente conectándose solamente el capacitor de arranque necesario para producir la cupla de arranque.

Un motor de Polos Impresos presenta tres modos de funcionamiento basados en la velocidad de rotación de la máquina. Ellos son: el modo arranque, modo de transición, y modo de operación [10].

La capa continua de material magnético en la superficie del rotor permite que se inscriban polos en cualquier lugar usando la bobina de excitación ubicada dentro de las bobinas del estator. Mientras el material magnético pasa debajo de esta bobina excitada, la misma es sometida al campo magnético alterno producido por el flujo de corriente en la bobina. La fuerza y orientación de este campo magnético controla la geometría de los polos magnéticos inducidos en el rotor. Si la polaridad del material magnético que pasa debajo de la bobina de excitación no coincide con la polaridad del campo magnético producido por la bobina, la polaridad del imán es invertida para que coincida con el campo producido por la bobina de excitación.

En la figura 5 se muestra primero el motor en funcionamiento normal, después se muestra los polos que han sido reimpresos ligeramente hacia la derecha de su posición anterior, y por último se muestra los polos reimpresos aún más hacia la derecha luego de otra vuelta.

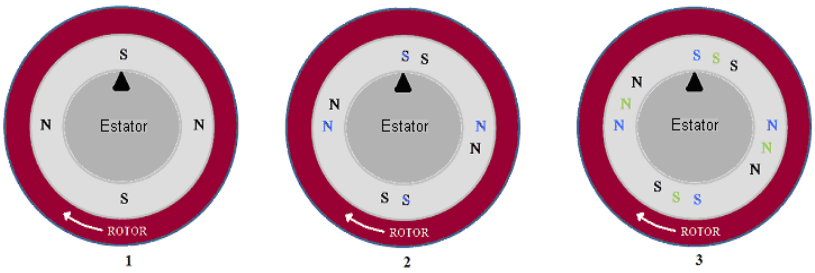

Figura 5. Impresión de polos.

Dado que la potencia suministrada a la bobina de excitación es una fuente senoidal de c.a. y de frecuencia constante, el tamaño real y cantidad de polos generados en la superficie del rotor dependen de la velocidad de rotación de la máquina. Si la velocidad de rotación es baja el número de polos será mayor con espacios pequeños entre cada polo, mientras a velocidades altas resultan en un número menor de polos con más espacios entre ellos.

Por ejemplo, para un motor de inducción de 4 polos, a 60 hz, su velocidad sincrónica es 1800 rpm Ec. (2). Durante el arranque el motor pasa de estar parado a llegar a su velocidad de

funcionamiento. Si imprimiéramos los polos a partir de las 600 rpm, el número de polos que se imprimiría varía desde 12 a 4, como se muestra en la tabla 1 para distintas velocidades.

RPM	POLOS
600	12
800	9
1200	6
1600	4.5
1800	4

Tabla 1. Velocidad versus número de polos.

Los polos temporarios impresos permiten al motor desarrollar el alto par de una máquina sincrónica cuando se aproxima a su velocidad sincrónica.

Al alcanzar su velocidad nominal, se desactiva la bobina de excitación permitiendo que la máquina funcione como una máquina sincrónica.

Con la ventaja que si se presenta una variación de la velocidad nominal de la máquina se enciende la bobina de excitación garantizando así que la geometría del polo en el rotor siga adaptada a los campos electromotrices de rotación producidos por la bobina del estator.

3.1. Modo arranque ($0 \leq \omega_r \leq \omega_t$)

Es el modo de operación del motor desde que está parado hasta la velocidad denominada de transición. El motor se comporta como un motor de inducción convencional con el aditamento de una capa de ferrita siendo la velocidad del rotor (ω_r) menor que la velocidad de transición (ω_t). Esta velocidad de transición se puede elegir entre 70 a 90% de la velocidad de sincronismo (ω_S) siendo un valor usual el 80%.

El par que acelera la máquina a su velocidad nominal, como se muestra en la figura 6, se produce por el efecto de histéresis y de inducción. El par de histéresis es producido cuando las corrientes del estator magnetizan la ferrita, el par de inducción está dado por la alta resistencia de la jaula y los capacitores.

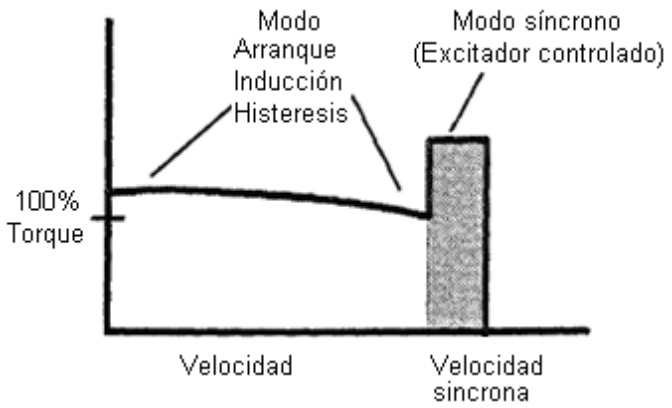

Figura 6. Características de arranque del par del motor de Polos Impresos (Written-Pole®).

3.2. Modo de transición ($\omega_t \leq \omega_r \leq \omega_s$)

Es el modo de funcionamiento que se produce desde que la velocidad del rotor coincide con la velocidad de transición elegida hasta cuando la máquina llega a la velocidad de sincronismo. Al llegar a la velocidad de transición deseada se desconecta el capacitor de arranque y se energiza la bobina concentrada adicional que se encuentra en el estator, encargada de imprimir los polos en el rotor que se ve en la figura 7. Comienza a imprimir en la capa magnética de ferrita polos magnéticos cuyo número es función de la frecuencia del estator y de la velocidad de transición del rotor manteniéndose siempre la igualdad de la Ec. (2).

Los polos se reimprimen en el rotor en diferente lugar físico mientras la velocidad se va incrementando. En el rotor se producen dos campos durante esta transición, uno creado por las corrientes inducidas y otro producido por los polos impresos.

El circuito de la bobina excitadora se diseña de forma tal que los campos magnéticos de los polos impresos por ella, se encuentren en fase con el campo magnético principal del estator para que se produzca un par máximo (τ_{max}) similar al par de un motor síncrono, mientras la velocidad del rotor va creciendo para llegar a la velocidad sincrónica (ω_S). Se puede concluir aquí que el motor de polos impresos trabaja como un motor síncrono en una franja de velocidades que van desde ω_t a ω_S.

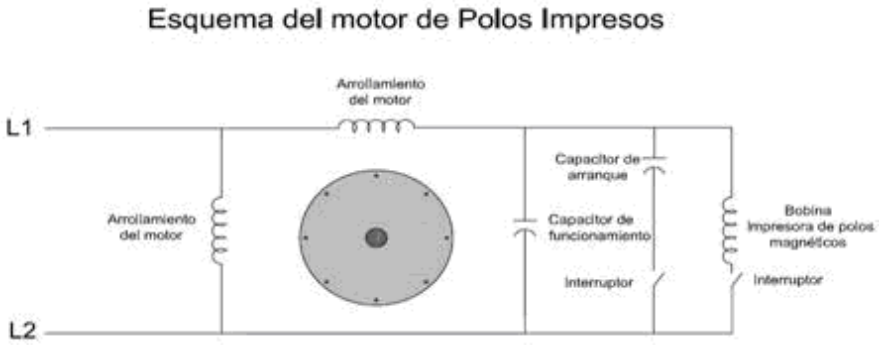

Figura 7. Circuito de arranque y operación del motor de Polos Impresos (Written-Pole®).

3.3. Modo síncrono (ω_s)

Cuando el motor alcanza la velocidad de régimen (ω_s) se apaga la bobina excitadora quedando impresa en la capa de ferrita el último patrón de polos, funcionando como un motor sincrónico convencional de imanes permanentes.

3.4. Modo de operación

Un motor de Polos Impresos entra en modo de operación al llegar a su velocidad síncrona nominal. Puesto que la operación de la bobina de excitación no es necesaria en este modo, ésta se apaga y el motor continúa funcionando como un motor síncrono de imán permanente.

Cuando un par excesivo es aplicado a la salida del eje, causando que el motor salga de sincronización, éste vuelve a entrar en modo de transición e intenta re-acelerar la carga de nuevo a la velocidad síncrona. En el caso que el par de la carga continúe superando la capacidad de la máquina, actuarán los dispositivos de sobrecarga para desconectar la carga.

3.5. Funcionamiento de re-arranque

Otra característica importante del motor de Polos Impresos que lo diferencia de un motor eléctrico convencional, es que este motor puede ser conectado de nuevo a una entrada de potencia eléctrica en cualquier momento que se produzca una pérdida de potencia en la entrada.

4. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE ENERGÍA DE LAS MÁQUINAS DE POLOS IMPRESOS (Written-Pole®) MONOFÁSICAS

Sus características de funcionamiento son:

- Baja corriente de arranque: Necesita sólo un tercio o un cuarto de la corriente de arranque de los motores de inducción monofásicos convencionales de igual potencia. Al disminuir 2 a 3 veces la corriente de arranque no provoca un hueco de tensión que afecten a los demás usuarios. De esta manera es posible aumentar notablemente la potencia instalada, como se muestra en la tabla 2. Este diseño no sacrifica el torque de arranque y no necesita dispositivos de reducción de tensión en el arranque para reducir la corriente. Al ser menor su corriente de arranque no produce calentamiento por lo que se puede emplear mayor tiempo para el arranque evitándose el penduleo tan característico de los motores monofásicos [6]. En las figuras 8 y 9 se observa el comportamiento de esta máquina durante el arranque.

Monofásico Convencional			Monofásico Polos Impresos		
Potencia [HP]	I_{nom}[A]	I_{arr}[A]	Potencia [HP]	I_{nom}[A]	I_{arr}[A]
5	22	150	20	68	130
7.5	28	220	30	100	185
10	39	288	40	130	245
15	70	377	60	200	360

Tabla 2. Comparación de las corrientes asignada y de arranque para motores monofásicos convencionales de 240 V y el motor monofásico de Polos Impresos (Written-Pole®) de 240 V.

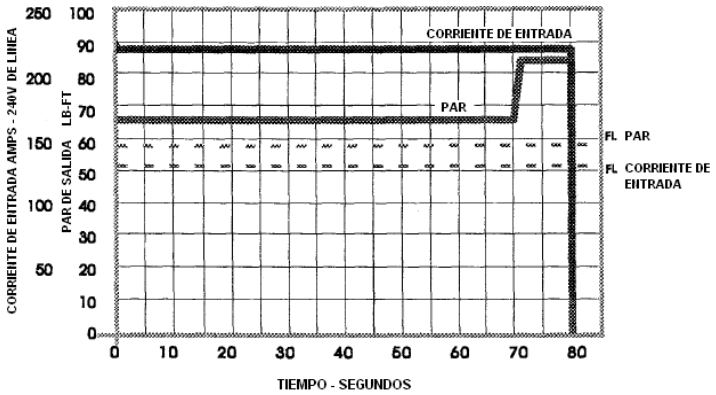

Figura 7. Corriente de arranque y par de arranque del motor de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásico de 40HP de rotor externo vs. Tiempo de arranque normal.

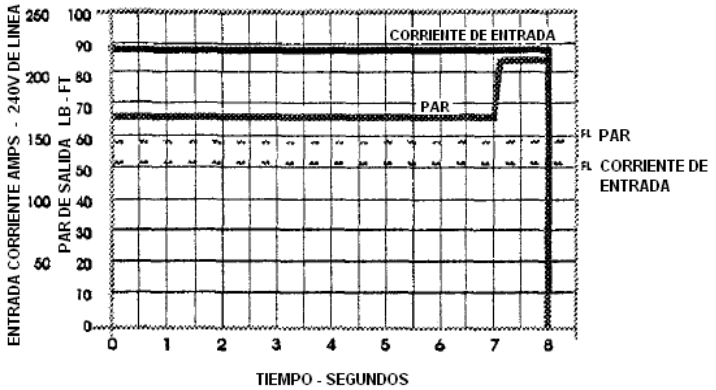

Figura 8. Corriente de arranque y par de arranque del motor de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásico de 40HP de rotor interno vs. Tiempo de arranque normal.

- Factor de potencia unitario y buena eficiencia energética en rango amplio de velocidad: La alta eficiencia de operación de un motor de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásico se hace posible por el hecho de que su modo síncrono de operación elimina pérdidas comúnmente asociadas con el deslizamiento en motores de inducción convencionales. Por la eliminación de las pérdidas resultantes en el rotor, los motores de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásicos son capaces de reducir sustancialmente las pérdidas totales, mejorando la eficiencia de operación, que se ve reflejada en la reducción de la facturación mientras que la menor corriente se refleja en la disminución de la sección de los cables, en los transformadores y en los contactores, por lo que se puede aumentar la potencia disponible sin variar los requisitos de corriente y potencia, como puede verse en la tabla 3.

  El modo síncrono de operación de un motor de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásico permite eficiencias de operación muy altas comparables a las de los motores trifásicos de alta eficiencia con características similares. Emplear un transformador de menor potencia y tener menores costos de operación representa una ventaja significativa sobre instalaciones comparables que usan motores trifásicos y convertidores de fase, esta comparación se muestra en la tabla 4, con el agregado que al tener factor de potencia unitario no se necesita compensar reactivo.

	Estándar	Polos Impresos	Comparación
Potencia (HP)	15	30	100% ↑
I_{nom} de línea	70	100	43% ↑
I_{arr} (línea)	377	185	51% ↓
Rendimiento (%)	82.0	94.1	15% ↑
Factor de potencia	0.86	1	16% ↑
P de entrada (kW)	13.6	23.8	75% ↑
S (kVA)	16.1	23.8	48% ↑

Tabla 3. Comparación entre un motor monofásico convencional de 230 V y el motor monofásico de Polos impresos (Written-Pole®) de 230 V.

	Motor trifásico	Motor monofásico de Polos Impresos	Comparación
Potencia (hp)	30	30	=
I_{nom} [A]	75	100	33% ↑
I_{arr}[A]	473	185	61% ↓
Rendimiento (%)	94.1	94.1	=
Factor de potencia	0.84	1	19% ↑
P (kW)	23.8	23.8	=
S (kVA)	27.0	23.8	11.9% ↓

Tabla 4. Comparación entre un motor trifásico de 208 V y un motor monofásico de Polos impresos (Written-Pole®) de 230 V.

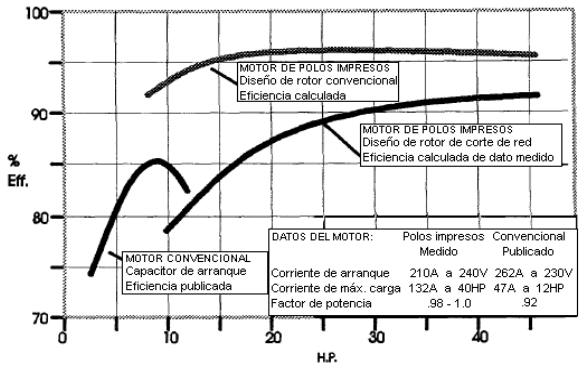

Figura 9. Rendimiento de un motor de inducción convencional monofásico vs. Datos preliminares de un motor monofásico de Polos Impresos (Written-Pole®) de 40HP.

- Diseño robusto y simple: Elimina la necesidad de arrancar con tensión reducida y al no emplear convertidores de fase (para el caso monofásico) no se introducen armónicas en la red reduciendo la complejidad de la instalación y disminuyendo las necesidades de mantenimiento. Los sistemas electrónicos basados en microprocesador, que se utilizan actualmente en distintos dispositivos de uso cotidiano exigen una mayor calidad de suministro de energía. Los centros de datos, las plantas de fabricación, los servidores Web y los centros financieros dependen de la calidad del servicio, requiriendo una confiabilidad

cercana al 99.99% [28, 31, 38]. Incluso los retrasos debidos a paradas momentáneas ocasionan pérdidas en la productividad. En la gráfica de la figura 10 se observa el contenido de armónicas para el motor sin carga (ésta es la situación más desfavorable pues el contenido de armónicas se reduce al cargarse el motor).

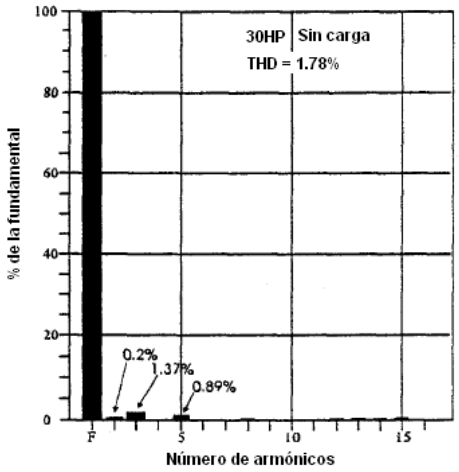

Figura 10. Contenido de armónicas de la tensión de entrada de un motor de Polos Impresos (Written-Pole®) de 30HP con rotor externo (sin carga).

- Baja temperatura de funcionamiento: Dado que las pérdidas eléctricas en las bobinas del estator de un motor eléctrico son proporcionales al cuadrado de la corriente, un motor de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásico genera nueve veces menos calor en el arranque que un motor de inducción convencional. La reducción resultante del calor mejora la confiabilidad, puesto que permite un aumento en la duración del arranque y una mayor frecuencia de ciclos de arranque. Aparte de mejorar la eficiencia se alarga la vida de los rodamientos y de las bobinas del motor.

- Capacidad de arrancar cargas de alta inercia: Al generarse menos calor puede prolongarse el tiempo para alcanzar el estado de régimen, por lo que se pueden arrancar cargas 10 veces mayores que las que podría arrancar un motor de inducción convencional de igual potencia. Un funcionamiento más suave disminuye el desgaste del sistema. Este efecto es aún más importante en las máquinas con rotor externo, cuya capacidad es reforzada porque está máquina sincroniza mientras cambia su velocidad estando bajo carga. A modo de ejemplo, en la figura 11 se presenta la evolución de la corriente cuando un motor opera a un compresor.

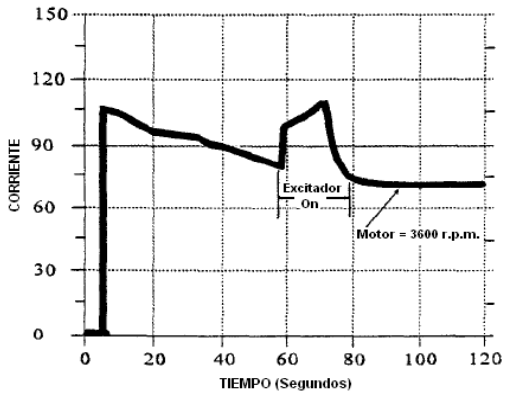

Figura 11. Corriente de arranque de un motor de Polos impresos (Written-Pole®) de 20HP con rotor externo operando un compresor. (Carga = 17 hp)

- Capacidad de re-arranque instantáneo: Las características de arranque de estos motores les permiten un re-arranque instantáneo después de una interrupción momentánea de energía sin producir los transitorios con alto contenido de armónicas comunes en los motores de inducción monofásicos y trifásicos cuando salen de servicio. Este motor puede soportar cortes de energía de hasta 15 segundos sin desengancharse y puede re arrancar inmediatamente una vez restaurada la energía eléctrica sin provocar grandes transitorios que dañen al motor o a la máquina accionada.

  En un generador convencional, el rotor gira a una velocidad fija, por ejemplo 1800 rpm (60 Hz). Cuando se produce una interrupción de energía la velocidad cae a 1260 rpm después de 2 segundos. Como la posición de los polos magnéticos en una máquina convencional es permanente, cuando la velocidad cae también lo hace la frecuencia a 42 Hz, valor suficiente para que se interrumpa el funcionamiento. En la máquina de Polos Impresos (Written-Pole®) la velocidad del rotor también se reduce después de una interrupción de energía pero la bobina del estator vuelve a imprimir los polos norte y sur sobre la capa magnetizable del rotor 60 veces por segundo. Esencialmente la bobina posiciona los polos para mantener una frecuencia de 60 Hz evitando así la interrupción del funcionamiento de la carga. Debido a su capacidad de alterar la ubicación de los polos en el rotor para que coincida con la velocidad mecánica, el motor no dejará de funcionar inmediatamente después de la pérdida de potencia, en su lugar, funciona durante 15 segundos o más antes de pararse, esto puede observarse en la figura 12. Cuando el rotor del motor de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásico tiene una configuración externa es posible realizar una integración creando un efecto de volante que le permite al motor continuar arrastrando la carga por más tiempo después de una interrupción de potencia (a una velocidad ligeramente reducida). Este volante suaviza el arranque y las paradas del motor reduciendo los golpes de ariete en los sistemas de riego, bombas de agua, ventiladores y sistemas de transporte.

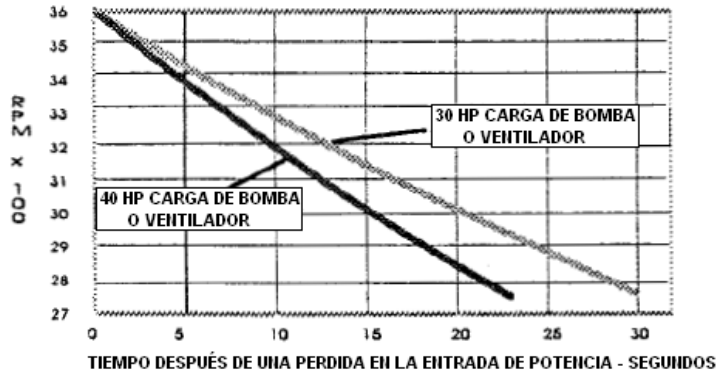

Figura 12. Tiempo del corte de alimentación a la carga luego de que se interrumpió el suministro de la red para un motor monofásico de Polos Impresos (Written-Pole®) de rotor externo de 40HP.

El rango de potencia de los motores monofásicos de Polos Impresos (Written-Pole®), actualmente, va desde 15HP hasta 100HP.

En la tabla 5 se pueden observar las características de las máquinas monofásicas de Polos Impresos (Written-Pole®) para 60 Hz según la potencia [7].

Potencia [HP]	**15**	**20**	**25**	**30**	**40**	**50**	**60**
Corriente de carga máxima (A) (240V)	52	67	84	100	133	166	198
Corriente de arranque	100	125	164	196	210	300	350
Corte de red a máxima carga: a. rpm después de 5 seg. b. rpm después de 10 seg.	 3300 3000	 3450 3250	 3400 3200	 3350 3150	 3300 3000	 3400 3050	 3400 3000
Torque (N m) a máxima carga	28,35	39,15	48,6	58,05	78,3	98,55	117,45
Torque (N m) de arranque	32,4	44,55	54	64,8	87,75	110,7	130,95
Torque de re arranque (después de un corte)	36,45	51,3	63,45	78,3	101,25	128,25	151,2

Tabla 5. Características de los motores de Polos Impresos (Written-Pole®) monofásicos de 15 a 60HP.

5. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE ENERGÍA DE LAS MÁQUINAS DE POLOS IMPRESOS (Written-Pole®) TRIFÁSICAS

El conjunto trifásico desarrollado por PPC forma un solo bloque integrado, donde el motor trifásico y el generador están fabricados con tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®) y se acoplan a través de un rotor externo compartido. Al conjunto se lo denomina ROESEL® o MGR (Motor Generador Roesel). En la figura 13 se aprecia la zona de generador y la de motor con sus devanados y sus capas de material magnético.

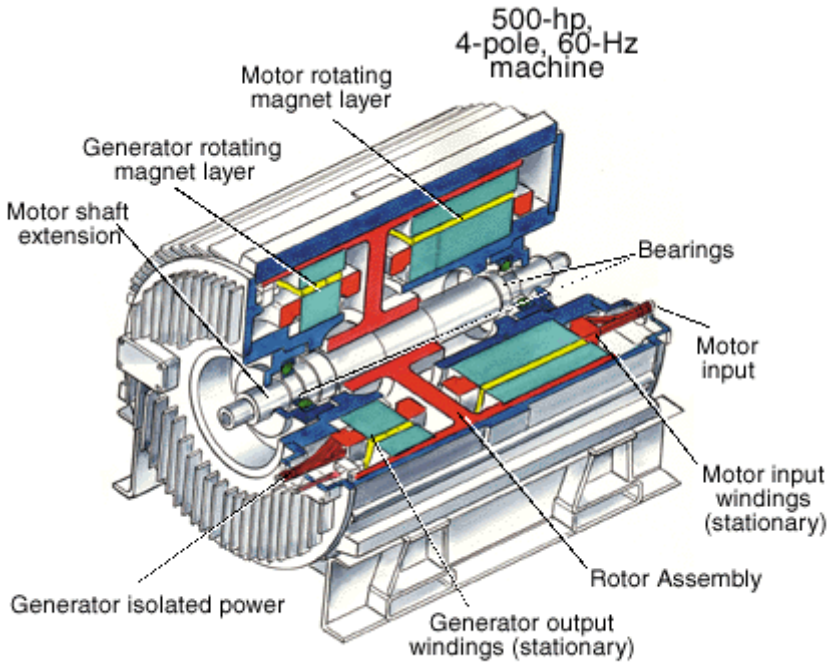

Figura 13. Motor Generador Roesel de 500HP. Meridium Power Inc.

El conjunto ROESEL® o MGR es una tecnología madura que se emplea para la conversión de tensión, frecuencia y fase. Se lo usa instalado a la entrada de alimentación de una industria utilizando el motor para impulsar mecánicamente al generador. El generador produce una señal de salida de calidad a frecuencia constante con velocidad variable del rotor y el motor opera de manera eficiente al tener un rotor de alta inercia que le permite almacenar energía en el volante. El conjunto aísla permanentemente al sistema de distribución de la carga, suministrando la tensión a frecuencia nominal cuando se producen interrupciones de energía de hasta 15 segundos, con el agregado de que el generador del MGR actúa como un filtro para las armónicas por lo que no produce disturbios en el sistema de distribución.

Los MGR se aplican donde se requiere mejorar los costos de producción por tener buen rendimiento y factor de potencia cercano a la unidad, confiabilidad de la operación y buen comportamiento ante los huecos e interrupciones breves de tensión [10][11].

Cuando se interrumpe la alimentación eléctrica, la energía inercial mantiene al generador girando asegurando una frecuencia constante mientras se imprimen los polos. Puesto que el tiempo de este proceso de desaceleración con carga nominal dura aproximadamente de 10 a 15 segundos, es lapso suficiente para asegurar el mantenimiento de la energía en el 99% de los casos, o da tiempo suficiente como para que los generadores de reserva se conecten a la línea si es necesario.

Cuando se produce un corte de tensión, siguen generando una tensión a frecuencia nominal aún cuando la máquina se esté frenando. Esta capacidad de seguir suministrando una salida constante está dada porque cambia el número de polos en el rotor asegurando siempre que sea el número de polos necesario para el sincronismo. Si el motor está girando entre el 85% y 100% de la

velocidad sincrónica, la salida se mantendrá a la frecuencia nominal. La inercia del volante permite al rotor del generador mantenerse girando a velocidades superiores al 85% de la sincrónica aún sin alimentación. Normalmente, el peso del rotor crea la inercia suficiente para mantener girando el conjunto y producir la frecuencia nominal durante 15 segundos (con carga nominal).

Sus características son:

- **Operación eficiente:** El diseño de estos motores trifásicos con tecnología de Written-Pole® hacen que sean más eficientes que los mejores motores trifásicos de inducción repercutiendo en los costos de operación.

- **Factor de Potencia Unitario:** En su funcionamiento síncrono, el grupo tiene factor de potencia unitario por lo que no es necesario corregir reactivo por lo que no generan armónicas en el sistema.

- **Baja corriente de arranque:** Con una corriente de arranque de 2 a 2,5 veces la corriente nominal, eliminan la necesidad de colocar equipos complejos para arranque con tensión reducida. Capacidad para arrancar con tensión plena sin sacrificar el torque.

- **Tolerancia a las tensiones desequilibradas:** Los motores de inducción convencionales sufren caídas en el rendimiento y un aumento de las temperaturas ante desequilibrios de tensión, mientras que en los MGR son mucho menores estas variaciones siempre y cuando el desequilibrio sea menor al 7,5% [14].

- **Sincronización flexible:** Logra la sincronización antes de llegar a la velocidad sincrónica mientras alimenta a la carga, dada su característica de poder arrancar con tensión plena por tener baja corriente de arranque.

- **Tolerancias a las sobretensiones y a los armónicos:** Mejora la confiabilidad de la operación aún en sistema fluctuantes o con desequilibrios de tensión. La reducción de armónicos a la entrada disminuye las perturbaciones que puedan ocasionar a otros equipos de la red de distribución. Al tener menos armónicos a la salida afecta menos al equipo alimentado.

- **Restablecimiento instantáneo:** Los motores síncronos y asincrónicos convencionales generan transitorios cuando se re-conectan luego de una interrupción momentánea. Para mitigar esto es que se suele retardar la reanudación hasta que haya disminuido la velocidad a un valor aceptable del torque para proteger a la máquina de daños. En cambio con esta tecnología los motores re-arrancan inmediatamente imprimiendo el número de polos conveniente para mantener el sincronismo.

- **Eliminación del sistema de alimentación ininterrumpida (UPS):** Al tener un volante de alta inercia se elimina la necesidad de UPS dado que al mantener por un tiempo más prolongado la alimentación a la carga, luego de producida una interrupción del suministro, permite que arranque el generador de reserva [14].

- **Sistema de Potencia Inteligente:** Cuando se adiciona un motor al sistema MGR, se constituye un paquete completo de protección de energía en un tamaño compacto al que se denomina "Sistema de Potencia Inteligente" (IPS). El IPS usa la inercia del volante del MGR para arrancar otro motor en reserva (standby) en reemplazo de una batería. Puesto que en los sistemas de respaldo de energía tradicionales el 70 a 80% de las fallas esperadas pueden atribuirse a arranques defectuosos de las baterías, esta configuración mejora la confiabilidad porque no se usa UPS. Dado que el MGR mantiene algunos segundos el suministro de toda la potencia, el motor adicional experimenta menos "falsos arranques" debidos a interrupciones momentáneas. Esta característica proporciona una rampa más gradual de arranque, aumenta la confiabilidad del sistema e incrementa la vida útil del motor en reserva. Algunas otras ventajas con respecto a las UPS tradicionales son el menor tamaño, la eliminación de equipos de interconexión compleja y la simplificación de los sistemas de ventilación. Las IPS pueden utilizarse como fuente de alimentación auxiliar para cargas tales como aire acondicionado, iluminación de emergencia y ventilación.

Los últimos diseños en los MGR llegan a 1000HP. En la tabla 6 se muestran las características de un MGR de 35 a 60 kVA.

Motor- Generador Roesel (MGR)®				
Potencia [kVA]	**35 kVA**	**40 kVA**	**50 kVA**	**60 kVA**
Tensión C.A.[V] (+10% - 15%) de entrada 3 fases, 4 hilos	208	208 / 480	208	480
Corriente nominal [A]	100	105 / 45	130	67
Corriente de arranque [A]	250	263 /113	239	168
Factor de potencia para carga asignada	0.95 (Mínimo)			
Potencia de salida [kW]	28	32	40	48
Factor de potencia de carga	0.9 adelanto a 0.8 atraso			
Transitorio (0-50 msec) < 50% variación de la carga	-15% to +10%			
Transitorio (50 msec – 500 msec) < 50% variación de la carga	± 8%			
Tasa de distorsión armónica (Cargas lineales)	≤ 3%			

Tabla 6. Características del grupo Motor Generador ROESEL® de 35 a 60 kVA.

6. ANÁLISIS REALIZADOS POR DISTINTOS LABORATORIOS INDEPENDIENTES DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA DE POLOS IMPRESOS

Ensayos del Laboratorio Independiente Friesen de Manitoba Hydro en 1996: Las pruebas que realizaron tenían como propósito verificar el rendimiento del motor de Polos Impresos y determinar su conveniencia para aplicaciones destinadas a sistemas monofásicos. El motor que fue probado es una máquina c.a. monofásica de 240 V de 15HP con velocidad sincrónica de 1800 rpm Se midió el rendimiento a 125%, 115%, 100%, 75%, 50% y 25% de la carga nominal. Además, se monitorearon las características de arranque para evaluar el rendimiento del arranque del motor a la tensión nominal. Para asegurar la precisión de los resultados de la prueba, el motor fue

operado a carga nominal durante 8 horas antes de comenzar la medición. La gran capacidad térmica del motor de rotor externo le permitió mantener una temperatura estable durante todo el tiempo del ensayo. Se relevaron las curvas de rendimiento, de corriente de arranque y del par de arranque. Se concluyó que las características de funcionamiento de este motor están dentro de las tolerancias razonables de estimaciones dadas por el fabricante. Las pruebas de rendimiento mostraron tener una eficiencia a plena carga del 92,0%. Esto es comparable a la eficiencia estándar en motores trifásicos y bastante superior a los motores monofásicos de inducción.

Alan Hannah de NRECA (National Rural Electric Cooperative Association Rural Electric Research Project) realizó en 1997 mediciones sobre un motor de Polos Impresos de rotor externo de 15 kW (20HP). La prueba de campo se realiza en una granja de criadero de cerdos en Oklahoma. El motor trabaja bombeando el agua de un estanque (nitratos 4%) que se usa para limpiar los corrales de cerdos y para el riego de pastos. El motor se acopló a una bomba centrífuga de 68,13 [m^3/h]. En la tabla 7 se comparan diversas características de la tecnología del motor de Polos Impresos con un motor de inducción convencional de 15 kW (20HP).

	20 HP MOTOR DE POLOS IMPRESOS	**20 HP MOTOR TRIFÁSICO CON CONVERTIDOR**	**10 HP MOTOR MONOFÁSICO**
Costo	$ 6500	$ 3450	$ 950
Peso	1000 lbs.	650 lbs.	295 lbs.
Eficiencia %	93 %	Motor 87.5 % Convertidor 95 %	89 %
Corriente de arranque P.U.	1.9 P.U.	6.0 P.U.	7.7 P.U.
Par de arranque	33 ft-lbs.	25 ft-lbs.	15 ft-lbs.
Par de funcionamiento	29 ft-lbs.	30 ft-lbs.	24 ft-lbs.
Factor de potencia de arranque %	60 %	30 %	60 %
Factor de potencia de funcionamiento %	100 %	92 %	N/A

Tabla 7. Motor de Polos Impresos versus motor convencional.

Morash estudió en 1997 un sistema de almacenamiento de energía, donde se plantea la posibilidad de que funcionaran como motores para bombas y ventiladores. El motor de Polos Impresos puede ser mirado como un rotor de alta inercia que proporciona almacenamiento de energía en el volante de manera de evitar problemas causados por interrupciones de energía y por caídas de tensión momentáneas, mejorando así la fiabilidad del sistema y la vida del motor porque no necesita ser re-arrancado por apagones momentáneos. El sistema MGR es comercialmente viable para reemplazar baterías. Este sistema puede proporcionar importantes ahorros de costos y reducir problemas ambientales relacionados con la eliminación de las baterías.

En 1999 Samart amplió la aplicación de MGR para grandes HP. Realizaron pruebas de campo comparando la aplicación de un motor trifásico con un convertidor de fase contra la del motor monofásico en zonas rurales. En la tabla 8 se muestra la comparación de los resultados de las pruebas.

	30 HP MOTOR DE POLOS IMPRESOS	30 HP MOTOR TRIFÁSICO CON CONVERTIDOR
TENSIÓN DE LÍNEA (V)	246	248
TENSIÓN DE LÍNEA @ INRUSH (V)	234	230
TENSIÓN DE OPERACIÓN (V)	242	245
CORRIENTE DE INRUSH (A)	199	251
CORRIENTE DE OPERACIÓN (A)	103	55
kVA @ 20 seg.	23.5	19.95
kVA @ 1 min.	18.11	19.87
kVA @ 15 min.	18	19.89

Tabla 8. Comparativa de los resultados de pruebas de campo.

Las conclusiones de esta comparación fueron: El motor de Polos Impresos es más eficiente y sus costos de operación más bajos, pero su costo de adquisición es más alto. La corriente de entrada es menor, por lo tanto, las fluctuaciones de tensión son de menor magnitud. Es más silencioso cuando está en funcionamiento, y tiene la capacidad de soportar cortes de red temporarios, pero pocas personas están familiarizados con la tecnología para realizar mantenimiento o trabajos de reparación del motor. El motor trifásico con convertidor funciona mejor cuando se requieren secuencias de encendido y apagado rápidos. Los costos de adquisición son menores y tiene un mejor factor de servicio.

7. MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DURANTE EL ARRANQUE

Debido al modo de funcionamiento de la tecnología de Polos Impresos (Written-Pole®) donde la máquina se comporta como de inducción y sincrónica al mismo tiempo, se analizaron dos propuestas realizadas por Mirsalim [18] y por Amêndola [19], uno modeló la primera etapa considerando que la máquina tiene sólo un comportamiento como máquina de inducción, le agrega el par debido a la histéresis y también considera el efecto del capacitor en el arranque; y el otro modeló la zona donde la máquina se comporta como de inducción y sincrónica a la vez.

7.1. Etapa Inicial como Máquina de Inducción

Las ecuaciones fundamentales de una máquina de inducción [17] son:

$$\begin{aligned} [\mathrm{v}]_s &= [\mathrm{r}]_s [\mathrm{i}]_s + p[\lambda]_s \\ [\mathrm{v}]_r &= [\mathrm{r}]_r [\mathrm{i}]_r + p[\lambda]_r \end{aligned} \qquad (4)$$

Llamando $p = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}$, λ= flujo concatenado.

Siendo V las tensiones, λ los flujos, i las corrientes, r las resistencias,.

Relacionando el flujo concatenado con la inductancia y la corriente se tiene:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^t & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para elaborar el modelo se consideran las siguientes hipótesis simplificativas:

- Las fuerzas magnetomotrices debidas a los bobinados del estator siguen una distribución sinusoidal espacial a lo largo del entrehierro, despreciándose las armónicas espaciales.
- Se desprecian los efectos de las ranuras del estator y del rotor en las inductancias.
- No se consideran los efectos de saturación.
- Las resistencias de los bobinados son idénticas.

Expresando las inductancias mutuas de la ecuación (4), vemos que están en función de la posición:

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} cos(\theta_r) & cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & cos(\theta_r) & cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Si se quiere calcular las corrientes, el cálculo se dificulta porque los valores de inductancia mutua varían con el tiempo. Para reducir la complejidad de estas ecuaciones diferenciales se usan transformaciones. Si transformamos el sistema trifásico en uno bifásico equivalente se logra que las inductancias mutuas transformadas sean constantes en el tiempo.

Se hace un cambio de variables respecto a un sistema de referencia conformado por un par de ejes fijos y un par de ejes móviles. Estos ejes representan los ejes magnéticos de los devanados del estator y rotor respectivamente. Al aplicar la transformación a,b,c-dq como se muestra en la figura 14, se obtiene una máquina bifásica equivalente (que produce igual Fuerza Magneto Motriz (FMM) e igual potencia) a la máquina en estudio.

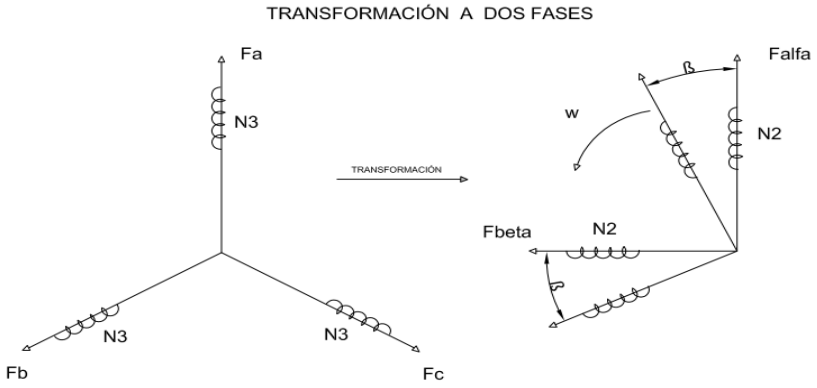

Figura 14. Transformación al sistema bifásico equivalente.

7.2. Ecuaciones de Tensión y Par de la Máquina Bifásica

En la primera etapa de la máquina de Polos Impresos (Written-Pole®) o sea en el período de aceleración inicial: se aplica la referencia d-q fija al estator o rotor parado.

Las ecuaciones de tensión del estator y del rotor en el modo asíncrono ($\omega_r < \omega_t \cong 0.8 * \omega_s$), se formulan tomando al sistema de referencia fijo en el estator y son similares a las de un motor de inducción convencional.

7.3. Modelo propuesto por Mojtaba Mirsalim

Para el modelado de la máquina de Polos Impresos (Written-Pole®), agrega: a) el efecto del capacitor de arranque y b) el efecto magnetizante de la capa de ferrita en el rotor [18].

Las ecuaciones de tensión en el marco de referencia fijo del estator resultan:

$$V_{qds} = r_s * i_{qds} + p * \lambda_{qds}[V] \tag{7}$$

$$V_{qdr} = r_r * i_{qdr} - \omega_r * \lambda_{qdr} + p * \lambda_{qdr}[V] \tag{8}$$

Siendo V las tensiones, λ los flujos, i las corrientes, r las resistencias, q y d los ejes directos y en cuadratura, s y r los arrollamientos del estator y del rotor.

Al utilizar la referencia fija del estator:

$$V_{qds} = k_{2s} * V_{abs} \tag{9}$$

$$V_{qdr=0} \tag{10}$$

$$k_{2s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Considerando las reactancias del capacitor de arranque y expandiendo las ecuaciones (7) y (8) se tiene:

Siendo q y d los ejes directos y en cuadratura, s y r los arrollamientos del estator y del rotor, ω_b es la velocidad angular eléctrica base usada para calcular las reactancias y ω_{fR} velocidad angular a la frecuencia de resbalamiento.

$$V_{qs} = r_r * i_{qs} + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{qs} \tag{12}$$

$$V_{qs} = r_s * i_{qs} + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{qs} \tag{13}$$

$$V_{ds} = (r_s + r_c) * i_{ds} + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{ds} + \frac{\omega_b}{p} * X_c \quad (14)$$

$$V_{qr}^{`} = r_r^{`} * i_{qr}^{`} - \frac{N_s}{N_r} * \frac{\omega_r}{\omega_b} * \psi_{dr}^{`} + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{qr}^{`} \quad (15)$$

$$V_{dr}^{`} = r_r^{`} * i_{dr}^{`} + \frac{N_s}{N_r} * \frac{\omega_r}{\omega_b} * \psi_{qr}^{`} + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{dr}^{`} \quad (16)$$

Las ecuaciones en función de las reactancias resultan:

$$\psi_{qs} = X_{ls} * i_{qs} + X_m * \left(i_{qs} + i_{qr}^{`}\right) \quad (17)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} * i_{ds} + X_m * \left(i_{ds} + i_{qr}^{`}\right) + \psi_m^{`} \quad (18)$$

$$\psi_{qr}^{`} = X_{lr}^{`} * i_{qr}^{`} + X_m * \left(i_{qs} + i_{qr}^{`}\right) \quad (19)$$

$$\psi_{dr}^{`} = X_{lr}^{`} * i_{qr}^{`} + X_m * \left(i_{ds} + i_{dr}^{`}\right) \quad (20)$$

$\psi_m^{`}$ es el flujo residual de la capa semipermeable de ferrita en la periferia del rotor y es añadido a ψ_{ds} (flujo en el eje directo del estator).

Al igual que en el motor asincrónico, el par electromagnético en función de la velocidad del rotor puede ser expresado como:

$$T_e = J * \left[\frac{2}{P}\right] * p * \omega_r + T_L \left[N.m\right] \quad (21)$$

Donde J es la inercia de la máquina [J.s²], p= número de polos, T_L= par de la carga.

El par electromagnético instantáneo:

$$T_e = \left[\frac{P}{2}\right] * \left[\frac{N_s}{N_r}\right] * \left[\frac{X_m}{\omega_b}\right] * \left[i_{qs} * i_{dr}^{`} - i_{ds} * i_{qr}^{`}\right] \quad \left[Nm\right] \quad (22)$$

7.4. Modelado de la Etapa de Transición

Cuando la velocidad alcanza el valor adoptado ($\omega_r = \omega_t \cong 0.8 * \omega_s$**),** se desactiva el capacitor de arranque y se excita la bobina adicional del estator con tensión de la red posicionándola para obtener un ángulo que maximice el par.

Una de las propuestas analizadas [17] plantea la hipótesis de que el efecto de las corrientes por las barras se puede despreciar y modela la máquina sólo como máquina sincrónica.

El otro modelo propuesto por César Amêndola [19] incluye el efecto de los campos originados por las corrientes inducidas.

7.5. Modelo Simplificado Considerando Solo Comportamiento Sincrónico

La corriente de excitación es:

$$\mathrm{i_{exc}} = \mathrm{i_{exc}} * cos(\omega_s * \mathrm{t}) \tag{23}$$

El comportamiento eléctrico y electromecánico de la mayoría de las máquinas eléctricas sincrónicas puede ser expresado por las ecuaciones que describen la máquina sincrónica trifásica de Polos Impresos. En particular, estas ecuaciones pueden ser usadas directamente para describir el rendimiento del motor sincrónico, turbogeneradores, generadores hidráulicos, y con algunas modificaciones, el motor de reluctancia.

El modelo para el motor de Polos Impresos presentado por Mirsalim agrega el efecto magnetizante de los polos impresos.

En el período de aceleración y sincronización se aplica la referencia d-q fija al rotor, la bobina del estator imprime polos magnéticos sobre la ferrita, si bien su número depende de la velocidad del rotor y la ubicación de los polos, cambia en cada vuelta.

El superíndice r indica que el marco de referencia está fijo en el rotor. Las ecuaciones de voltaje del rotor resultan:

$$\mathrm{V_{qs}^r} = \mathrm{r_s} * \mathrm{i_{qs}^r} - \frac{\mathrm{N_e}}{\mathrm{N_s}} * \frac{\mathrm{r}}{\omega_b} * \psi_{qs}^r + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{qs}^r \tag{24}$$

$$\mathrm{V_{ds}^r} = (\mathrm{r_r} + \mathrm{r_a}) * \mathrm{i_{ds}^r} - \frac{\mathrm{N_e}}{\mathrm{N_r}} * \frac{\omega_r}{\omega_b} * \psi_{ds}^r + \frac{p}{\omega_b} * \psi_{ds}^r + \frac{\omega_b}{p} * \mathrm{X_d} \tag{25}$$

Donde X_d es la reactancia del capacitor usado para lograr un factor de potencia unitario. Los polos temporarios causan que la máquina se comporte como sincrónica en el rango de transición, no circulando corriente por las barras.

Reescribiendo las ecuaciones de flujo concatenado por segundo:

$$\psi_{qs}^r = (\mathrm{X_{ls}} + \mathrm{X_m}) * \mathrm{i_{qs}^r} \tag{26}$$

$$\psi_{ds}^r = (\mathrm{X_{lr}} + \mathrm{X_m}) * \mathrm{i_{ds}^r} + \psi_m^r \tag{27}$$

ψ_m^r es el flujo concatenado debido a los polos impresos, definimos:

$$\psi_m^r = \psi_m\left(1+\beta cos\left(\omega_b * t\right)\right) \tag{28}$$

Donde β es el coeficiente que varía entre 0.1 y 0.3 de acuerdo a la frecuencia y a la velocidad del rotor.

Considerando el ángulo de retardo de la corriente de excitación y la posición relativa del flujo se tiene un par de máquina sincrónica cuya ecuación puede ser escrita como:

$$T_e = \left[\frac{P}{2}\right] * \left[\frac{N_r}{N_e}\right] * \left[\frac{1}{\omega_b}\right] * \left[i_{qs}^r * \psi_{ds}^r - i_{ds}^r * \psi_{qs}^r\right] \tag{29}$$

En la condición de servicio ($\omega_r = \omega_s$), la máquina se comporta como una máquina sincrónica convencional de imanes permanentes.

La ecuación de par es análoga a la de la etapa de funcionamiento anterior.

7.6. Modelo considerando los efectos de las corrientes inducidas y de los Polos Impresos

El modelo para la máquina de Polos Impresos presentado por Amêndola para el comportamiento de transición supone que las barras en el rotor están alimentadas por una fuente cuya frecuencia es la del deslizamiento: $\omega_r - \omega_s$.

$$v_{qr} = V_r.seno\left(\omega_{fR}.t\right) \tag{30}$$

$$v_{dr} = V_r.seno\left(\omega_{fR}.t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{31}$$

Se modela tomando como referencia el rotor. Se presentan las siguientes ecuaciones de tensión (32), de flujo concatenado (33) y de corriente en el estator (34), considerando los efectos de las corrientes inducidas y de los polos impresos:

$$V_{qs} = \frac{r_s}{L_{ls}}\left(\lambda_{qs} - \lambda_{qm}\right) + p\lambda_{qs} + \omega_r\lambda_{ds} \qquad V_{qr}^r = \frac{r_r^`}{L_{lr}^`}\left(\lambda_{qr}^` - \lambda_{qm}\right) + p\lambda_{qr}^`$$

$$V_{ds} = \frac{r_s}{L_{ls}}\left(\lambda_{ds} - \lambda_{dm}\right) + p\lambda_{qs} - \omega_r\lambda_{qs} \qquad V_{dr}^r = \frac{r_r^`}{L_{lr}^`}\left(\lambda_{dr}^` - \lambda_{dm}\right) + p\lambda_{dr}^` \tag{32}$$

$$\lambda_{qm}^r = \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{ls}} + \frac{1}{L_{lr}}\right)\left(\frac{\lambda_{qs}^r}{L_{ls}} + \frac{\lambda_{qr}^`}{L_{lr}^`}\right)$$

$$\lambda^{r}_{dm} = \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{ls}} + \frac{1}{L_{lr}} \right) \left(\frac{\lambda^{r}_{ds}}{L_{ls}} + \frac{\grave{\lambda}_{dr}}{\grave{L}_{lr}} \right) \tag{33}$$

$$i^{r}_{qs} = \frac{\lambda^{r}_{qs} - \lambda^{r}_{qm}}{L_{ls}} \qquad \grave{i}_{qr} = \frac{\grave{\lambda}_{qr} - \lambda^{r}_{qm}}{\grave{L}_{lr}} \tag{34}$$

$$i^{r}_{ds} = \frac{\lambda^{r}_{ds} - \lambda^{r}_{dm}}{L_{ls}} \qquad \grave{i}_{dr} = \frac{\grave{\lambda}_{dr} - \lambda^{r}_{dm}}{\grave{L}_{lr}}$$

7.7. Análisis comparativo de ambas propuestas

La propuesta de Mojtaba Mirsalim modela a la máquina por etapas de funcionamiento, hace el modelo de comportamiento como máquina de inducción agregándole el efecto del capacitor. En la etapa de transición no considera el efecto de las corrientes inducidas en las barras debido al resbalamiento ni el que se produce mientras se imprimen los polos, a este modo como máquina sincrónica, agregándole el efecto de magnetización de la impresión de polos como se observa en la ecuación (27).

En el trabajo de César Amêndola para la etapa de transición agrega una fuente de tensión a la frecuencia de resbalamiento en el rotor para alimentar las barras (30) y (31) y presenta las ecuaciones de tensión y corriente, (32) y (34).

Ambos enfoques son buenos y novedosos pero incompletos para describir los fenómenos que se presentan en esta singular máquina.

8. REFERENCIAS

1. Mecrow, B.C., Jack, A.G.: Efficiency trends in electric machines and drives. Journal: Energy Policy, vol 36, Nº 12, pp 4336-4341. (2008).

2. Siddiqui, Omar: Energy Efficiency: Promise and Realities. EPRI Global Climate Change Research Seminar. Washington, D.C. (19 de Mayo de 2010).

3. Roesel, John F. Jr. Introduction and Overview of “Witten-Pole”™ Technology. Northcon 95. IEEE Technical Applications Conference and Workshops Northcon 95, pp 130. (10-12 Octubre 1995). Portland USA.

4. Barber, Ronnie J., Morash, Richard T.:Operating and Electrical Characteristics of "Written-Pole"TM Machine. NORTHCON 95. IEEE Technical Applications Conference and Workshops Northcon 95., pp. 149-153. (10-12 Octubre 1995). Portland USA.

5. Prado Iratchet, Susana; Pinzón Montes, Andrea; Massa, Pablo Antonio: Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para aplicaciones Industriales. CLAGTEE 2011, (Noviembre 2011). ISBN 978-85-64689-00-8.

6. Morash, Richard T.: Case Histories of Selected Applications with “Witten-Pole™” machines Northcon 95. IEEE Technical Applications Conference and Workshops Northcon 95, pp. 154. (10-12 Octubre 1995). Portland USA..

7. Roesel, John F. Jr. Morash, Richard T.: Advancement of Power Technology Using Written- Pole ™ Motors and Generators- An Overview. IEEE Conference. WESCON.1996. Pp. 196 – 200. (22- 24 de Octubre de 1996).

8. Hannah, Alan: Electrical Field Measurements on an EPRI Two-Pole, 20-HP Written Pole Motor. IEEE Transactions On Industry Applications, vol 33. Nº2. pp 408-414. March/April (1997).

9. Empresa Precise Power Corporation de la Florida. Página de disponible Written-Pole® Single-Phase Motors. www.precisepwr.com.

10. PDH engineer.com- Course NºE 3023- Continuing Education for Engineers Written-Pole Motors- http://pdhengineer.com/pages/E-3023.

11. Byung-Taek Kim, Dae-Kyong Kim, Se-Hyun Rhu and Byung Il Kwon: A Study on the Ferromagnetic Layer of a Single-phase Written-pole Motor in Consideration of Demagnetizing Field Intensity. Prodeeding of International Conference on Electrical Machines and Systems (Oct 8 al 11 2007), Seoul, Korea.

12. Byung-Taek Kim, Dae-Kyong Kim, Se-Hyun Rhyu, Duck-Shick Shin, and Byung-Il Kwon: Exciter Design and Characteristic Analysis of a Written-Pole Motor, IEEE trans. On Mag.,Vol 45 Nº3. pp 1768-1771. (March 2009).

13. Jae-Hak Choi, Sung-Ho Lee: The rewritable effects of bonded magnet for large starting par and high efficiency in the small power single-phase written pole motor. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 105, 07F117 (2009).2009. American Institute of Physics. (DOI: 10.1063/1.3076418). (2009).

14. Seong-cheol Park, Jeong-hyun Song and Byung-taek Kim, Optimization of a Squirrel Cage Rotor of a Written Pole Motor For Improvement of Magnetization Characteristics. Conference Electromagnetic Field Computation. (2010). página 1.

15. Liang Cao and Ge Li.: Complete Parallelogram Hysteresis Model for Electric Machines. IEEE Energy Conversion. (2010).IEEE Journal. pag 626-632.

16. K. L . SHI, T . F. CHAN, Y. K. WONG and S. L . HO: Modelling and simulation of the tree phase induction motor using Simulink. Int. J. Elect. Enging. Educ., Vol. 36, pp. 163–172. Manchester U.P., (1999). Printed in Great Britain.

17. Krause, P.C. Analysis of electric machinery and drive systems. Ed Mohamed E. Ei-Hawary. Series Editor. 2002. 613 páginas.

18. Khosousi, H. Zabet, Mirsalim,M: Dynamic Modeling of a 20-Horsepower Single-Phase Written Pole Motor, IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 40. No. 4. pp 1901-1904. (July 2004).

19. Amêndola, Cesar A. M., Gonzaga, Diógenes P: Mathematical Modeling and Computer Simulation of the Written-PoleTM Single-Phase Motor (WPSM). Electrical Engineering Dept., Engineering School of São Paulo, Brazil. VIII Congresso Luso-Espanhol de Engenharia Electrotécnica/Vilamoura/Portugal. (2003).

20. Susana Prado Iratchet, Fabiana Ferreira Aycardi, Andrea Pinzón Montes, Maximiliano Veliz. “La tecnología de Polos Impresos: una alternativa para mejorar la Calidad de la Energía". *II Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica* CLADE 2012, Setiembre de 2012. Rosario, Santa Fe, Argentina. ISBN: 978-987-97399-5-2.

21. Susana Prado Iratchet, Andrea Pinzón Montes, Maximiliano Veliz, Pablo Massa “Modelando la máquina eléctrica de Polos Impresos- Written Pole®” *I Congreso Argentino de Ingeniería* CADI 2012, Agosto de 2012, Mar del Plata, Argentina. ISBN 978-987-1312-46-7.

22. B. Ben Banerjee, Tejindar P. Singh, P.E. “EPRI's Program with large horsepower single-phase Written-Pole Motors”- ISBN# 0-7803-2639- NORTHCON95. IEEE Technical Applications Conference.

23. Roger Lawrence, “Applications and markets for written pole-single phase motors to 100 horsepower”. Northcon 95. IEEE Technical Applications Canference and workshops Northcon 95. ISBN 0-7803-26393- pp142-148.

24. John F. Roesel, Jr. “Improved power quality with “Written-Pole” ™ Motor- Generators and “Written-Pole”™ Motors”. IEEE Conference. Southeastcon '96. 'Bringing Together Education, Science and

Technology'., Proceedings of the IEEE . 10.1109/SECON.1996.510136 Publication Year: 1996 , Page(s): 565 – 570

25. John F. Roesel, Jr. Y Richard T. Morash. “Advancemente of Power Technology Using Written- Pole ™ Motors and Generators- An Overview”. IEEE Conference. 10.1109/WESCON.1996.553987 Pag(s): 196 – 200.ISBN#0-7803-3274-1

26. Ronnie J. Barber and Richard T. Morash “Applications, Test Data and Case Histories of Single-phase Written-Poler Motors”- Conference Ewscon. 1996. Pag(s): 201-205. ISBN# 0-7803-3274-1

27. Dale Friesen, Dennis St. George, Manitoba Hydro. “Independent Laboratory and Field Tests of a Written-Pole ™ Motor. ISBN # 0-7803-3274-1. WESCON 1996.

28. Richard T. Morash- Applications of written-pole Roesel Motor-Generators for radar installation power protection- IEEE Conference- Wescon/96- pp216-221.

29. S. Hoffman, B. Banerjee, M. Samotyi, “Written-Pole Revolution”, IEE Power Engineering Review, pp 6-9. December 1997.

30. Richard Morash. “Application of Written-Pole™ Motors and generators with Integrated Flywheel Energy Storage System”. Energy Conversion Engineering Conference. Pag 1758-1761. vol 3. 1997.

31. Richard T. Morash, John F. Roesel, Ronnie J. Barber. “Integral System for Energy Storage and Power Generation Uses Witten- Pole™Ac Motor and DC Generator Plus Flywheel and Gas Engine; Eliminates Batteries at Cellular Sites”. IEEE Conference. Telecomunications Energy Conference. 1998. INTELEC. Twenthieth International. Pag 716-

32. David E. Smart, “Written Pole Motors- A Practical Solution to Large HP Motor Needs?”, Rural Electric Power Conference 1999. Page B 4/1- B4/6. Mayo 1999. Indianapolis. ISBN 0780352440.10.1109/REPCON. 1999.768684

33. Richard T. Morash Dale Friesen Rick Knick. “Advancements in Written-Pole®Products for Rural Applications”. Rural Electric Power Conference. 2000. Pag B2-1al B2-8

34. Precise Power Corporation. Written-Pole® Single-Phase Motors. www.precisepwr.com; www.written-pole.com.

35. J. Boake, TDJ Hennessy, J. Roesel. “Demand-Side Solutions for extending the capacity of rural reticulations nerworks using Written_Pole Technology”. 1996- IEEE-07803-3019-6/96

36. Gimenez Alvarez, J.M., Gomez Targarona, J.C. “Optimización de la transferencia energética de la generación eólica empleando distintos tipos de generadores, considerando su impacto en el Sistema Eléctrico”. XIII ERIAC-CIGRÉ. Mayo 2009- XIII/PI-A1-11.

37. Página de electricidad, http://www.electricnet.com/doc.mvc/Written-Pole-Technology-Meets-Power-Quality-C-0001

38. Manitota Hydro, empresa de energía eléctrica y gas natural de Canadá. www.hydro.mb.ca/pop/guides/electric_motors.pdf

39. Artículo del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI: Electric Power Research Institute) de Norteamérica http://www.accessmylibrary.com/article-1G1-20816453/written-pole-motor-technology.html.

Los resultados de las distintas etapas de esta investigación fueron publicados en:

2011- IX Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica. Mar del Plata, Argentina. Trabajo: “Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para aplicaciones Industriales”. ISBN 978-85-64689-00-8.

2012- 2º Congreso Latinoamericano de Distribución Eléctrica CLADE 2012. Rosario, Santa Fe, Argentina. Trabajo: “La tecnología de Polos Impresos: una alternativa para mejorar la Calidad de la Energía". ISBN: 978-987-97399-5-2.

2012- 1º Congreso Argentino de Ingeniería CADI 2012, Mar del Plata, Argentina. Trabajo: “Modelando la máquina eléctrica de Polos Impresos (Written Pole®)”. ISBN 978-987-1312-46-7.

2013- XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control. Bariloche, Río Negro, Argentina. Trabajo: “Singularidades de la máquina de Polos Impresos, su modelación un desafío”. ISBN 978-987-27739-7-7.

2013- Revista Argentina de Ingeniería. Artículo: “Comportamiento de máquinas eléctricas con la tecnología de Polos Impresos”. Año 1, Volumen 2. Agosto de 2013, 8 páginas.