



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS DE 1'5 A 3 KW

Alumno: José Ángel Cánovas Mateu

Tutor: Prof. D. Ignacio Jesús Pérez Guerrero

Dpto: ingeniería eléctrica



Universidad de Jaén
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don Ignacio Pérez Guerrero, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: "DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DE MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS DE 1'5 A 3 kW ", que presenta José Ángel Cánovas Mateu, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2017

El alumno:

Firma manuscrita en tinta negra del alumno José Ángel Cánovas Mateu.

José Ángel Cánovas Mateu

El tutor:

Firma manuscrita en tinta azul del tutor Ignacio Pérez Guerrero.

Ignacio Pérez Guerrero

Contenidos:

CAPITULO UNO	13
1.1 Introducción	14
1.2 Objetivos y proceso del trabajo de fin de grado	15
1.3 Estructura del Trabajo fin de grado	16
CAPITULO DOS	18
2.1 Introducción al motor de inducción	19
2.2 Características principales	20
2.2.1 Deslizamiento	20
2.2.2 Factor de potencia	22
2.2.3 Corriente de arranque	22
2.2.4 Momento de inercia	23
2.2.6 Rendimiento	24
2.3 Pérdidas y diagrama de flujo de potencia	25
2.3.1 Balance de potencias	25
2.4 Modelo matemático de la máquina de inducción trifásica según Krause	26
2.4.1 Ecuaciones de tensión en máquinas variables	26
2.4.2 Ecuación de par en máquinas variables	32
2.3 Efecto de la temperatura en la eficiencia de los motores de inducción	34
2.4 El efecto de la altura en la eficiencia de los motores de inducción	35
2.6 Medidas para mejorar la eficiencia de un motor	39
2.7 Ley de paschen	40
CAPITULO TRES	42
3.1 Influencia de la temperatura en el desempeño del motor de inducción, condicionamiento de la potencia mecánica en el eje.	43
3.1.1 Introducción.	43

3.1.2 Importancia del rendimiento en los motores de inducción	44
3.1.3 Pérdidas y rendimiento en un motor de inducción	46
3.2 Normativa	48
3.2.1 Norma IEC 60034-2-1	48
3.2.2 Método directo con medida del par	49
3.2.3 Suma de pérdidas con medida del par	50
3.2.4 Suma de pérdidas sin medida del par	53
3.3 Consideraciones de utilización y aprovechamiento	54
3.3.1 Límite de seguridad térmica y la evolución con respecto al tamaño y potencia	55
3.3.2 Influencia de la temperatura ambiente	56
3.3.3 Influencia de la altitud sobre el nivel del mar de la aplicación	57
3.4 Limite mecánico del motor eléctrico de inducción	58
3.5 Obtención de los datos	60
3.5.1 Equipo de medida usados	61
3.6 Descripción de los ensayos	64
3.6.1 Aparatos de medida para magnitudes eléctricas, velocidad y frecuencia	65
3.6.2 Medición de la temperatura	65
3.6.3 Carga	65
3.6.4 Valores de la carga	66
3.7 Procedimientos de ensayo	67
3.7.1 Montaje y alineación del motor con la dinamo freno	67
3.7.2 Conexión de los equipos de medida	67
3.7.3 Ensayo de carga progresiva	70
3.7.4 Ensayo de carga constante	71
3.8 Problemas y vicisitudes en la realización de los ensayos	72

CAPITULO CUATRO	74
4.1 tabla de características de los motores	75
4.2 Ensayo con aumento de carga progresiva	75
4.2.1 Motor de 1,5 kW	75
4.2.2 Motor de 2,2 kW	79
4.2.3 Motor de 3 kW	83
4.3 Ensayo a carga constante	88
4.3.1 Motor de 1,5 kW	88
4.3.2 Motor 2,2 kW	91
4.3.3 Motor 3 kW	96
4.4 Proceso de trabajo	101
4.5 Calculo de la climatización de la sala de trabajo	102
CAPITULO CINCO	105
5.1 Comparación de datos	106
5.1.1 Motor de 1'5 kW	106
5.1.2 Motor de 2'2 kW	106
5.1.3 Motor de 3 kW	107
5.2 Análisis de los datos obtenidos	108
5.2.1 Climatización de la sala	109
5.2.2 Alineación y ajuste de los motores	110
5.2.3 Transitorios	112
5.3 Desde el punto de vista practico	112
Bibliografía	114

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1 Balance de potencias</i>	26
<i>Ilustración 2 Esquema de una máquina de inducción trifásica</i>	28
<i>Ilustración 3 Circuito equivalente de una máquina de inducción trifásica</i>	29

<i>Ilustración 4 Grafica de la presión del aire con respecto a la altitud.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 5 Grafica de volumen especifico/ densidad con respecto a la altitud.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 6 Curvas de eficiencia y factor de potencia en un motor de 22 kW</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 7 Rendimiento de los motores en las categorías Eff1, Eff2 y Eff3 (hasta 80kW).....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 8 Distribución de pérdidas (%) en un motor de 1,5kW (condiciones nominales)</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 9 Distribución de las pérdidas de un motor de 1,5kW en función de la fracción de potencia</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 10 Determinación de las perdidas por rozamiento + ventilación.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 11 Grafica para la determinación de las perdidas en el hierro</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 12 Recta de perdidas residuales</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 13 Asignación de las perdidas adicionales en carga, según la potencia del motor</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 14 Evolución de la temperatura</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 15 Relación entre t^o y P_n ante los incrementos de temperatura</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 16 Relación grafica entre altitud y potencia nominal del motor</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 17 Multímetro AMPROBE 33XR-A</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 18 Multímetro MY64.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 19 Analizador de redes fluke 434b</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 20 Termómetro infrarrojo fluke 65.....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 21 Termómetro digital.....</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 22 Dinamo-freno usada para los ensayos</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 23 Caja de resistencia monofásica</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 24 Alineación y anclaje del motor de 1'5KW con la dinamo freno.....</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 25 Tapa de conexiones con cables de conexión.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 26 Detalle de las pinzas correctamente conectadas</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 27 Detalle de las pinzas de potencia conectadas.....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 28 Detalle de la fijación del termómetro digital</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 29 Montaje del analizador de redes en el motor.....</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 30 Imagen del primer tipo de conexión de los aparatos de medida</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 31 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 20 °C.....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 32 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 23 °C.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 33 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 25 °C</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 34 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 35 Temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 36 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 20 °C.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 37 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 23 °C.....</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 38 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 25 °C.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 39 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, de las distintas temperaturas</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 40 Temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.</i>	<i>83</i>

<i>Ilustración 41 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 20 °C.....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 42 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 23 °C.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 43 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 25 °C.....</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 44 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, de las distintas temperaturas</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 45 Temperatura rendimiento del motor 3 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 46 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 20 °C.....</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 47 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 25 °C.....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 48 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 49 Temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 50 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 20 °C.....</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 51 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 25 °C.....</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 52 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 25 °C.....</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 53 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 54 Temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 55 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 20 °C.....</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 56 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 25 °C.....</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 57 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 40 °C.....</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 58 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, de las distintas temperaturas</i>	<i>100</i>
<i>Ilustración 59 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo líneas de tendencia.</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 60 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 23 °C, en el ensayo de aumento de carga progresiva.....</i>	<i>112</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Metodos de determinacion para el rendimiento, segun norma IEC 60034-2-1.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2 Valores de la temperatura según el tipo de aislante</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3 Evolución de la potencia de un motor para un determinado tamaño.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4 % de potencia disponible</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 5 Relación entre altitud y potencia nominal del motor</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 6 Posible incremento de la potencia disponible en un motor.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 7 Valores de la carga.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 8 Datos del motor de 1'5 kW.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 9 Datos del motor de 2'2 kW.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 10 Datos del motor de 3 kW.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 11 Datos ensayo con aumento de carga, motor 1,5 KW, a 20 °C</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 12 Datos ensayo con aumento de carga, motor 1,5 KW, a 23 °C</i>	<i>77</i>

Tabla 13 Datos ensayo con aumento de carga, motor 1,5 kW, a 25 °C	78
Tabla 14 Datos ensayo con aumento de carga, motor 2,2 kW, a 20 °C	80
Tabla 15 Datos ensayo con aumento de carga, motor 2,2 kW, a 23 °C	80
Tabla 16 Datos ensayo con aumento de carga, motor 2,2 kW, a 25 °C	81
Tabla 17 Datos ensayo con aumento de carga, motor 3 kW, a 20 °C	84
Tabla 18 Datos ensayo con aumento de carga, motor 3 kW, a 23 °C	85
Tabla 19 Datos ensayo con aumento de carga, motor 3 kW, a 25 °C	86
Tabla 20 Datos ensayo con carga constante, motor 1,5 kW, a 20 °C	89
Tabla 21 Datos ensayo con carga constante, motor 1,5 kW, a 25 °C	90
Tabla 22 Datos ensayo con carga constante, motor 1,5 kW, a 40 °C	90
Tabla 23 Datos ensayo con carga constante, motor 2,2 kW, a 20 °C	92
Tabla 24 Datos ensayo con carga constante, motor 2,2 kW, a 25 °C	94
Tabla 25 Datos ensayo con carga constante, motor 2,2 kW, a 40 °C	95
Tabla 26 Datos ensayo con carga constante, motor 3 kW, a 20 °C	97
Tabla 27 Datos ensayo con carga constante, motor 3 kW, a 25 °C	98
Tabla 28 Datos ensayo con carga constante, motor 3 kW, a 25 °C	99
Tabla 29 Cálculo de las frigorías necesarias para la climatización del laboratorio.....	104
Tabla 30 a 20°C con 55% de la carga.....	106
Tabla 31 a 23°C con 40% de carga.....	106
Tabla 32 a 25°C con 60% de carga.....	106
Tabla 33 a 20°C.....	106
Tabla 34 a 25°C.....	106
Tabla 35 a 40°C.....	106
Tabla 36 a 20°C con 80%.....	106
Tabla 37 a 23°C con 50% carga.....	107
Tabla 38 a 25°C con 85% carga.....	107
Tabla 39 a 20°C.....	107
Tabla 40 a 25°C.....	107
Tabla 41 a 40°C.....	107
Tabla 42 a 20°C 90%	107
Tabla 43 a 23°C 65%	107
Tabla 44 a 40°C 100%	107
Tabla 45 a 20°C.....	108
Tabla 46 a 25°C.....	108
Tabla 47 a 40°C.....	108
Tabla 48 motor de 1'5 kW ensayo con aumento de carga.....	108
Tabla 49 motor de 2'2 kW ensayo con aumento de carga.....	108
Tabla 50 motor de 3 kW ensayo con aumento de carga	109
Tabla 51 motor de 1'5 kW ensayo a carga constante	109
Tabla 52 motor de 2'2 kW ensayo a carga constante	109

Tabla 53 motor de 3 kW, ensayo a carga constante..... 109

Tabla 54 ensayo motor 1'5 kW, de aumento de carga progresiva, completo..... 111

Nomenclaturas

N_{des}	Es la velocidad de deslizamiento
N_{sin}	Es la velocidad del campo magnético de la maquina
N_m	Es la velocidad mecánica en el eje del motor
S	Deslizamiento de la maquina asíncrona
P_L	Potencia de línea (W)
V_L	Tensión de línea (V)
$\cos\phi$	Factor de potencia
P_u	Potencia útil producida por el motor (W)
P_T	Potencia total o absorbida de la red eléctrica por el motor (W)
η	Rendimiento
P_p	Potencia de perdidas (W)
P_{cu}	Perdidas en el cobre (W)
P_{FYR}	Perdidas por fricción (W)
P_{sal}	Potencia de salida (W)
P_{abs}	Potencia absorbida de la red por la maquina (W)
P_{cu1}	Perdidas por efecto joule o perdidas en el cobre del estator (W)
P_{fe}	Perdidas en el hierro (W)
P_s	Potencia al rotor de la maquina (W)
P_{cu2}	Perdidas por efecto joule en el rotor (W)

P_{mec}	Potencia mecánica (W)
$P_{carga\ max}$	Potencia útil con carga máxima conectada
$P_{freg+ad}$	Perdidas por rozamiento y pérdidas adicionales (W)
SLL	Perdidas adicionales debidas a la carga (W)
P_u	Potencia útil (W)
N_s	Número de vueltas del bobinado en el estator
R_s	Valor de la resistencia en el estator (Ω)
N_r	Número de vueltas del bobinado en el rotor
R_r	Valor de la resistencia del bobinado en el rotor (Ω)
f_{as}	Función de la secuencia "a" del estator
f_{bs}	Función de la secuencia "b" del estator
f_{cs}	Función de la secuencia "c" del estator
V_{abcs}	Tensión resultante en estator (V)
V_{abcs}	Tensión resultante de las variables de la maquina en el estator (V)
V_{abcr}	Tensión resultante de las variables de la maquina en el rotor (V)
I_{abcs}	Intensidad que circula por el estator (A)
I_{abcr}	Intensidad que circula por el estator (A)
i'_{ra}	Intensidad en el devanado del rotor referida al estator (A)
i_r	Intensidad de fase del rotor (A)
i_s	Intensidad de fase del estátor (A)
λ_{abcs}	Flujo magnético de enlace en el estator (Wb)
λ_{abcr}	Flujo magnético de enlace en el rotor (Wb)
λ	Enlaces de flujo (Wb)
λ'	Enlaces de flujo del rotor referidos al estátor (Wb)
F_{abcs}^T	<i>Resultante dela dirección de la tensión, en el estator, sobre los planos abc</i>

F_{abc}^T	<i>Resultante de la dirección de la tensión, en el rotor, sobre los planos abc</i>
f_r^-	Función general en el rotor referida al estátor
f_s^-	Función general en el estátor
f_{abc}	Función general en los ejes abc
f_{dq0}	Función general en los ejes dq0
f_r	Función general en el rotor
L_s	<i>Inductancia en el estator (H)</i>
L_r	Inductancia en el rotor (H)
L_{sr}	Inductancia mutua de entre el rotor y el estator (H)
L_{rl}	Inductancia de dispersión de la bobina del rotor (H)
L_{rm}	Inductancia magnetizante de la bobina del rotor (H)
L_{sl}	Inductancia de dispersión de la bobina del estátor (H)
L_{sm}	Inductancia magnetizante de la bobina del estátor (H)
L'	Inductancia referida al estátor (H)
N_s	<i>Numero de espiras de cobre, en la fase del estator</i>
N_r	<i>Numero de espiras de cobre, en la fase del rotor</i>
W_f	<i>Energía almacenada en el campo magnético (W*h)</i>
W_m	Energía mecánica (W*h)
I	<i>matriz identidad</i>
T_e	<i>Par electromagnético (N*m)</i>
T_{max}	Par máximo del que es capaz del motor
$T_{carga\ max}$	Par del motor con carga máxima que es capaz de soportar generada
T_{res}	Par resistente (N*m)
θ	Angulo de desfase
θ_r	Angulo eléctrico del rotor

Θ_{rm}	<i>Desplazamiento angular del rotor</i>
P	<i>Número de polos de la maquina</i>
adc	Ejes ortogonales
dq0	Ejes de referencia
e_r	Fuerza electromotriz inducida en la bobina del rotor (V)
e_s	Fuerza electromotriz inducida en la bobina del estátor (V)
E_-	Vector de campo eléctrico
g	Espesor del entrehierro
r	Radio del rotor (m)
R_s	Resistencia de fase del estátor (Ω)
β	Inducción electromagnética (T)
ω	Pulsación
ω_r	Velocidad angular del rotor (rad/s)
ϕ_s	Flujo devanados del estátor
ϕ	Flujo devanados del rotor
ϵ_0	Constante permeabilidad (F/m)
D	<i>Vida útil del aislante</i>
t	<i>Temperatura (°C)</i>
Q_1	<i>Calor interno generado (Kcal)</i>
Q_E	<i>Calor evacuado (Kcal)</i>
C_e	<i>calor específico</i>
M	<i>Masa propia del motor</i>
σ	<i>Incremento de la temperatura respecto al ambiente</i>

CAPITULO UNO

Introducción, finalidad y proceso

1.1 Introducción

Hoy en día la eficiencia energética está más en boga que nunca y nada hace plantear que esto cambie en un futuro (desde el punto de vista eléctrico el estudio y conocimiento de dichas características de consumo). En zonas como la unión europea y en concreto España donde se carece de energías primarias clásicas (petróleo, carbón) la apuesta dubitativa e incluso contra productiva por las energías renovables con el Real Decreto-ley 6/2009. En este marco de exigencia de eficiencia energética nace la normativa UNE-EN 60034-30 "clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única". Los motores de inducción serán los sujetos del estudio del presente trabajo de fin de grado. La cual hace mención a tres aspectos.

- Seccionamiento de los diferentes niveles de eficiencia.
- Características constructivas de los motores y exigencias para la creación de motores nuevos.
- Determinación del rendimiento.

Uno de los aspectos que influyen en el rendimiento y por tanto la eficiencia de los motores de inducción es la temperatura ambiente de la sala de trabajo. Considerándose que una temperatura baja mejora el rendimiento y una alta lo decremente. Aun siendo esta afirmación cierta es difícil cuantificar la pérdida y de suma importancia su conocimiento en pos de una mejor eficiencia.

Mi trabajo de fin de grado pretende determinar la influencia de la temperatura ambiente en los motores de inducción, mediante la realización de ensayos y toma de datos. Con este objetivo he usado motores de distinta potencia, de 1'5 kW, 2'2 kW y 3 kW. Llevándose a cabo dos tipos de ensayos distintos y a distintas temperaturas.

El enfoque del trabajo no es únicamente el estudio de la influencia de la temperatura ambiente en los motores de inducción, también se ha buscado una aplicación práctica. Dicha aplicación se ha basado en el uso de temperaturas habituales presente en el exterior del laboratorio. Con el fin de controlar sus condiciones de trabajo dentro de los márgenes en que una pequeña variación de temperatura (con coste energético asumible) produzca una variación de eficiencia apreciable. De tal modo que También es de considerar que el uso de forma regular

y ordenada de tales métodos podría ayudar a dilucidar el desempeño de los motores y la posible degradación de éstos conforme se dilata su espacio en el tiempo.

Evidentemente aparte de los motivos prácticos del uso de la aplicación de la normativa y conocimiento de la misma. La realización de este trabajo es motivada también con el fin del conocimiento teórico práctico de máquinas síncronas las cuales se escapa de las prácticas dadas en las asignaturas durante el grado.

1.2 Objetivos y proceso del trabajo de fin de grado

El objetivo del presente trabajo es discernir si el control de la temperatura ambiente en el lugar de trabajo de los motores influye en su eficiencia. Dentro de unos rangos de temperatura asumibles por la industria (es decir que el coste necesario para asumir esa temperatura no sea mayor que los beneficios aportados o esperados). Usando en este caso motores trifásicos de inducción o asíncronos.

Para realizar dicho objetivo se hará uso de la norma (UNE, IEE, CEI). Teniendo en cuenta que la norma no habla, ni determina como hallar el rendimiento tomando como variable la temperatura ambiente. No se puede usar la norma para la determinación de la eficiencia que buscamos. Por tanto, los ensayos se fijarán a la norma lo máximo posible. Variando en los casos que es necesario con el fin de tener los datos necesarios para la elaboración de la deducción del trabajo de fin de grado y el objetivo perseguido.

Para el estudio se han delimitado primeramente los parámetros de las máquinas estudiadas mediante diferentes métodos. Usando el modelo matemático para máquinas de inducción de Krauser. Dichas ecuaciones se basan en aspectos físicos de la máquina. Con el fin de facilitar los cálculos todos los datos estarán referidos a uno de sus devanados ya sea al estator o al rotor (usualmente al estator). También junto con los ensayos propios para determinar el rendimiento de la máquina en distintos regímenes de temperatura. Se ha desarrollado los ensayos para obtener los parámetros de la máquina mediante métodos tradicionales (cortocircuito, vacío, a plena carga). Dichos ensayos nos permiten tener los parámetros de la máquina de inducción aplicando las ecuaciones del comportamiento.

En cuanto a los ensayos para determinar la influencia de la temperatura ambiente. Se ha controlado la temperatura ambiente y la temperatura de la máquina.

Si como las potencias absorbidas y útil del motor de inducción. Usando dos tipos de procesos. El primero en el que se parte desde el arranque en carga y a partir de ahí aumentando progresivamente la carga intentando alcanzar el 100% de la potencia útil de la carga y si se ha podido llevar acabo el 125%, puesto que constructivamente y por normativa todos los motores eléctricos deben ser capaces de soportar dicha potencia en un corto periodo de tiempo. Un segundo tipo de experimento en el que se fija una carga que, sin llegar a ser el valor de plena carga del motor, es importante. Para después tomar datos y viendo la evolución de la potencia entregada y consumida conforme el motor alcanza su temperatura de funcionamiento.

Los ensayos se han realizado en tres motores de diferentes potencias asignadas: 1,5; 2,2 y 3 kW respectivamente, de acuerdo con las normas descritas anteriormente UNE EN 60034-28 "Ensayos para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula de ardilla de baja tensión" y UNE EN 60034-2-1 "Métodos normalizados para la determinación de pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos".

Estructura del Trabajo Fin de Grado

1.3 Estructura del Trabajo fin de grado

La estructura del trabajo de final de grado ha sido planteada en los siguientes cinco capítulos:

En el capítulo número 1. Introducción, finalidad y proceso del trabajo de fin de grado. Descripción principal de la base de estudio del trabajo expuesto.

En el capítulo número 2. Máquina de inducción trifásica. Introducción básica simplificada de las características principales de la máquina de inducción trifásica, junto con el modelo matemático desarrollado por Krauser que define la teoría electromagnética y permite la obtención de un circuito equivalente, a partir de una serie de ecuaciones según el sistema de referencia usado.

En el capítulo número 3. Normativa. En el presente trabajo ha sido necesario el uso de la normativa UNE-EN 60034-30, UNE EN 60034-28 y la UNE EN 60034-2-1 las cuales proporcionan la obtención de las características de las máquinas de inducción y dan una base de planteamiento para los ensayos ideados en el presente trabajo para obtener la influencia de la temperatura ambiente en el rendimiento.

Escuela politécnica Superior de Jaén

En el capítulo número cuatro. Resultados. Para la realización del presente trabajo de fin de grado se han empleado motores de distintas potencias nominales. A saber: 1'5, 2'2 y 3 kW respectivamente en el laboratorio, en el laboratorio de máquinas eléctricas de la escuela politécnica superior de Jaén. Consiguiendo satisfactoriamente cumplir los requisitos necesarios para la determinación de la influencia de la temperatura. Los ensayos realizados han sido denominados como: ensayo con aumento de carga progresiva y ensayo a carga constante.

En el capítulo número 5. Conclusiones. Análisis de datos y justificación de la influencia de la temperatura ambiente en el rendimiento de los motores de inducción trifásicos.

CAPITULO DOS

Máquina de inducción trifásica

2.1 Introducción al motor de inducción

Los motores asíncronos o de inducción son un tipo de motor de corriente alterna (en el caso del presente trabajo usados trifásicos) en el que la corriente eléctrica del rotor, necesaria para producir torsión, es inducida por inducción electromagnética del campo magnético de la bobina del estátor. Por lo tanto, un motor de inducción no requiere una conmutación mecánica aparte de su misma excitación como en los universales, DC y motores grandes síncronos. El primer prototipo de motor eléctrico capaz de funcionar con corriente alterna fue desarrollado y construido por el ingeniero Nikola Tesla y presentado en el año 1888.

El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos (jaula de ardilla o bobinado), y un estátor, en el que se encuentran las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio. Según el Teorema de Ferraris, cuando por estas bobinas circula un sistema de corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase en el tiempo es también de 120° , se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor según la Ley de inducción de Faraday. La diferencia entre el motor a inducción y el motor universal es que en el motor a inducción el devanado del rotor no está conectado al circuito de excitación del motor, sino que está eléctricamente aislado. Tiene barras de conducción en todo su largo, incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia. Las barras están conectadas con anillos a cada extremidad del rotor.

Entonces se da el efecto Laplace (o efecto motor): todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento. Simultáneamente se da el efecto Faraday (o efecto generador): en todo conductor que se mueva en el seno de un campo magnético se induce una tensión. El campo magnético giratorio, a velocidad de sincronismo, creado por el bobinado del estátor, corta los conductores del rotor, por lo que se genera una fuerza electromotriz de inducción.

La acción mutua del campo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor, originan una fuerza electrodinámica sobre dichos conductores del rotor, las cuales hacen girar el rotor del motor.

La diferencia entre las velocidades del rotor y el campo magnético se denomina deslizamiento o resbalamiento.

2.2 Características principales

2.2.1 Deslizamiento

Hay dos términos que se usan para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos. Uno es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$N_{des} = N_{sin} - N_m \quad (2.2.1-1)$$

Donde:

N_{des} es la velocidad de deslizamiento

N_{sin} es la velocidad del campo magnético de la maquina

N_m es la velocidad mecánica en el eje del motor

El otro concepto utilizado es el deslizamiento, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje, es decir que se define así:

$$s = \frac{N_{des}}{N_{sin}} * 100 \quad (1.2.1-2)$$

Al poner en funcionamiento el motor, el rotor está en estado estacionario, así que la velocidad es $n=0$ y el deslizamiento es unitario $s=1$, en cambio, cuando el rotor gira a una velocidad nominal $s=0$, todas las velocidades normales del motor caen dentro de estos dos límites. Dependiendo del valor del deslizamiento, se distinguen tres zonas distintas que caracterizan tres modos de funcionamiento: motor, generador y freno.

El modo de funcionamiento más característico es el de motor y corresponde al rango de deslizamiento comprendido entre 0 y 1. Si se tiene en cuenta el campo de variación de s en el régimen motor se tiene:

-potencia mecánica interna positiva. El motor transmite energía mecánica al eje.

-potencia en el entrehierro positiva. El par electromagnético de la máquina es positivo.

-potencia en entrehierro positiva. El sentido de la transmisión de energía es estator-rotor.

Cuando trabaja como generador corresponde a las velocidades superiores a la de sincronismo lo que comporta deslizamientos negativos. El motor de inducción funciona como generador recibiendo energía mecánica de un motor externo que gira a una velocidad superior a la del sincronismo, y entregando energía eléctrica a la red por el estátor.

En el régimen generador, al ser el deslizamiento negativo, se tiene:

- potencia mecánica interna negativa. La máquina absorbe potencia mecánica por el eje.
- potencia en el entrehierro negativa. El par electromagnético de la máquina asíncrona cambia de signo respecto al comportamiento como motor.
- potencia en el entrehierro se hace negativa, la transferencia de energía se hace de rotor a estátor.

El régimen de frenado de una máquina asíncrona se produce para deslizamientos superiores a la unidad, lo que corresponde a velocidades negativas. En esta situación el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio, de tal forma que la máquina recibe energía de la red y energía mecánica por el eje. Cuando s es mayor a 1 resulta:

- La resistencia de carga se hace negativa y por tanto también es negativa la potencia mecánica interna. La máquina recibe energía mecánica por el eje.
- La potencia de entrehierro es el cociente de dos cantidades negativas; por consiguiente, la potencia es positiva y el par electromagnético es positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere la energía en el sentido estátor-rotor. Por ello la potencia que se absorbe de la red es positiva.

Durante el período de frenado la máquina recibe energía mecánica por el eje y también energía eléctrica de la red. Este régimen de frenado se utiliza en la práctica

cuando se desea parar rápidamente un motor. La maniobra se realiza invirtiendo dos fases de la alimentación, de forma que el campo giratorio pase súbitamente a girar en sentido contrario al del rotor

2.2.2 Factor de potencia

La siguiente ecuación define el factor de potencia

$$\cos \varphi = \frac{Pl}{\sqrt{3} * VI} \quad (2.2.2-1)$$

En la curva característica par- velocidad hay tres zonas diferenciadas donde el factor de potencia actúa de forma diferente. En la primera zona que es la región de bajo deslizamiento, donde la reactancia del rotor es despreciable, el factor de potencia del rotor es aproximadamente unitario. En la segunda región de deslizamiento moderado, donde la reactancia del rotor tiene el mismo orden de magnitud que la resistencia del rotor, el factor de potencia comienza a disminuir. En la tercera región que se llama de alto deslizamiento, la carga aumenta y el aumento en la corriente del rotor no se percibe debido a la disminución en el factor de potencia en el rotor.

2.2.3 Corriente de arranque

Los motores trifásicos de inducción presentan una intensidad en el momento del arranque del orden de entre 4 y 7 veces la nominal, para motores de jaula sencilla. Esta sobreintensidad decrece rápidamente conforme el motor adquiere velocidad, hasta estabilizarse en un valor razonable en su punto de trabajo. No obstante, esta “punta de corriente de arranque” provoca caídas de tensión y perturbaciones en la red que puede afectar a otros receptores. El REBT en la instrucción ITC-BT-47, obliga a incorporar sistemas adecuados que limiten la intensidad en el arranque.

La corriente de arranque puede variar en forma amplia, depende de la potencia nominal del motor y de la efectividad de la resistencia del rotor en condiciones de arranque.

La corriente de arranque de un motor de inducción se puede reducir con un circuito de arranque, pero también reducirá el par de arranque del motor.

Cuando se reduce la corriente de arranque en proporción directa a la disminución del voltaje en los terminales, el par de arranque disminuye con el cuadrado del voltaje aplicado. Sólo se puede lograr una cierta reducción de la cantidad de corriente si el motor debe arrancar con una carga en su eje.

2.2.4 Momento de inercia

El arranque de la máquina de inducción está condicionado directamente por su valor del momento de inercia. El cual es superado debido al gran par de arranque de los motores de inducción. El par de arranque antes mencionado suele superar varias veces el par nominal de la máquina asíncrona. La necesidad de un mayor par de arranque es directamente al mayor momento de inercia de la máquina, es mayor momento de inercia crea una demora mayor de tiempo hasta alcanzar la velocidad nominal asignada. Haciendo que la corriente que circula por este periodo, la cual es mayor a la corriente nominal, circule durante más tiempo.

El momento de inercia de las características físicas del motor de inducción y en especial su peso. Se puede afirmar que un motor pesado creara un mayor momento de inercia que uno ligero. Siendo la relación peso/inercia una relación lineal en la mayoría de los casos.

2.2.5 Par de arranque y Par máximo

Hay un par máximo posible que el motor puede desarrollar. Este par, llamado par máximo o par 2de desviación, es dos o tres veces el par nominal a plena carga del motor. El par máximo se obtiene cuando la potencia en el entrehierro es máxima. Ya que cuando la potencia en el entrehierro es igual a la potencia consumida por el resistor $R_{2/s}$, el par máximo inducido se produce cuando la potencia consumida por este resistor sea máxima.

El deslizamiento del rotor para el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor.

Este par es proporcional al cuadrado del voltaje suministrado e inversamente al tamaño de las impedancias del estátor y de la reactancia del rotor, a pesar que el deslizamiento en el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor, el par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor.

El par de arranque del motor es un poco mayor al par a plena carga, por lo que este motor puede arrancar con cualquier carga que pueda alimentar a plena potencia.

En un motor de inducción, el par máximo en la curva será de 200% a 250% del par nominal a plena carga de máquina y el par de arranque (el par a velocidad cero) será de aproximadamente entre 1,1 y 1,5 veces el par nominal del motor.

2.2.6 Rendimiento

Como en cualquier otro dispositivo de transformación de la energía, existen unas pérdidas, de tal forma que solamente se entrega a la salida una parte de la energía absorbida en la entrada. El rendimiento o la eficacia de un motor vienen determinado por las pérdidas que se producen en la máquina. El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil y la potencia absorbida o total, de acuerdo con la expresión:

$$\eta = \frac{P_u}{P_T} \quad (2.2.6-1)$$

Siendo:

P_u la potencia útil producida por el motor.

P_T la potencia total o absorbida de la red eléctrica por el motor.

La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida de una máquina son las pérdidas que se presentan dentro de ella. Por lo tanto, la ecuación se puede representar así:

$$\eta = \frac{P_u}{P_p + P_u} \quad (2.2.6-2)$$

Siendo:

P_p la potencia de pérdidas

Las primeras pérdidas que se observan son las pérdidas I^2R en los devanados del estátor también llamadas las pérdidas en el cobre del estátor P_{cu} . Luego se pierde cierta cantidad de potencia por los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas de Foucault que aparecen en el material ferromagnético del núcleo, que conforman las pérdidas en el hierro. La potencia restante pasa a través del entrehierro entre el estátor y el rotor. Una vez transferida dicha potencia una parte de ella se pierde I^2R a esta se le llama pérdidas en el cobre del rotor. Por último, las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire P_{FyR} . La potencia restante es la salida del motor es decir la potencia de salida P_{sal} . Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción o por rozamiento con el aire por lo tanto serán más pequeñas las pérdidas en el núcleo.

2.3 Pérdidas y diagrama de flujo de potencia

2.3.1 Balance de potencias

El circuito equivalente del motor de inducción presenta grandes similitudes con el circuito equivalente del transformador (asociando primario a estátor y secundario a rotor). La diferencia principal radica en que el rotor siempre está en cortocircuito para que el motor funcione (aparición de corrientes inducidas en el rotor de forma automática al disponer de un bobinado cerrado) y que el consumo en la resistencia de carga es, en realidad, la potencia mecánica desarrollada por el motor. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia:

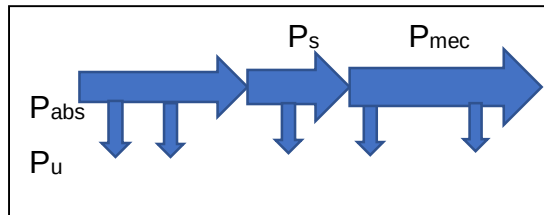


Ilustración 1 Balance de potencias

Siendo:

P_{abs} la potencia absorbida de la red por la maquina

P_{cu1} Pérdidas por efecto joule o pérdidas en el cobre del estator

P_{fe} Pérdidas en el hierro

P_s Potencia al rotor de la maquina

P_{cu2} Pérdidas por efecto joule en el rotor

P_{mec} Potencia mecánica

$P_{freg+ad}$ Pérdidas por rozamiento y pérdidas adicionales

SLL Pérdidas adicionales debidas a la carga

P_u Potencia útil

Todas las potencias y pérdidas se miden en vatios (W)

2.4 Modelo matemático de la máquina de inducción trifásica según Krause

2.4.1 Ecuaciones de tensión en máquinas variables

En la ilustración 2 se muestra una máquina de inducción de dos polos cuya distribución de bobinados es simétrica, los devanados de estátor son idénticos, desplazados 120° grados, con una distribución sinusoidalmente. Con un número (N_s) determinado de vueltas equivalente y resistencia (R_s). Consecuentemente los devanados del rotor también serán considerados como tres devanados idénticos sinusoidalmente distribuidos y al igual que en el estator con un desplazamiento de 120° . De nuevo el número (N_r) determinado de vueltas equivalentes y una resistencia (R_r). La dirección mostrada del eje magnético en la ilustración 2 es la positiva. Como nota aclaratoria he de indicar que la dirección positiva de los ejes magnéticos del devanado del estator coincide con la dirección de f_{as} , f_{bs} y f_{cs} .

Las expresiones de las ecuaciones de tensión en las variables de la maquina son:

$$V_{abcs} = r_s * i_{abcs} + P \lambda_{abcs} \quad (2.2.4-1)$$

$$V_{abcr} = r_r * i_{abcr} + P \lambda_{abcr} \quad (2.2.4-1)$$

Donde:

$$f_{abcs}^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (2.2.4-3)$$

$$f_{abcr}^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad (2.2.4-4)$$

Como nota aclaratoria en las ecuaciones anteriores la 's' del subíndice hace referencia al estator, por tanto, el subíndice 'r' hace referencia al rotor. Ambos 'Rs' y 'Rr' son matrices diagonales, cada uno con igual elementos distintos de cero. Para un sistema magnéticamente lineal, los vínculos de flujo pueden estar expresado como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.2.4-5)$$

Las inductancias del bobinado del estator se definen como:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.2.4-6)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.2.4-7)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.2.4-8)$$

En las ecuaciones de inducciones anteriores 'L_{ls}' y 'L_{ms}' son, respectivamente, las inductancias de fuga y de magnetización de los devanados del estator. Consecuentemente 'L_{lr}' y 'L_{mr}' son las inductancias de fuga y de magnetización para el devanado del rotor.

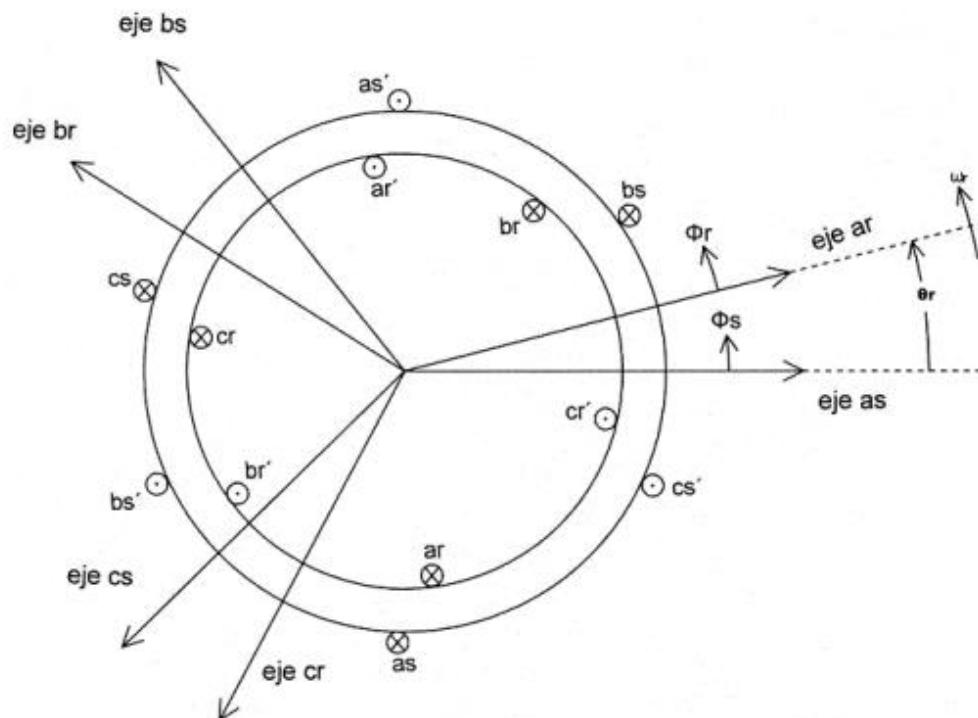


Ilustración 2 Esquema de una máquina de inducción trifásica

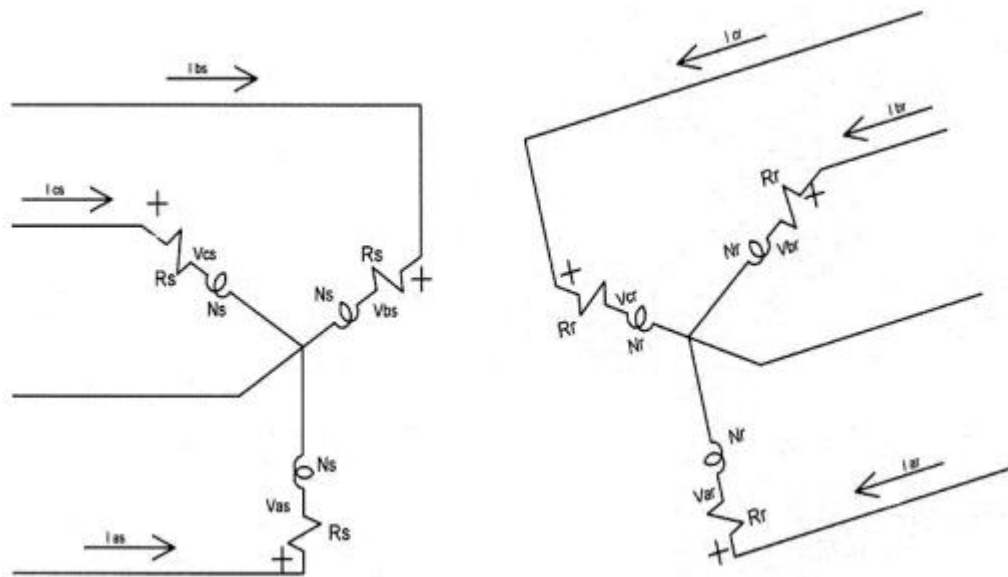


Ilustración 3 Circuito equivalente de una máquina de inducción trifásica

La inductancia L_{sr} es la amplitud de las inductancias mutuas entre bobinados del estátor y del rotor. La mayoría de las máquinas de inducción carecen del bobinado del rotor enrollado. En su caso, la corriente fluye por las barras de cobre (o de aluminio si se diera el caso de estar hechas de este material) que están uniformemente distribuidas y que están incrustadas en un material ferromagnético con todos los finales de las barras en un anillo común para cada extremo del rotor. La configuración descrita para el rotor se conoce como un rotor de jaula de ardilla. Puede parecer a primera vista que la inductancia mutua entre un rotor bobinado uniformemente y uno bobinado sinusoidalmente en el estátor no sería de la forma dada por la fórmula (2.2.4.8) Sin embargo, en la mayoría de los casos, un devanado distribuido uniformemente está debidamente descrita por su componente sinusoidal fundamental y está representado por el equivalente a un arrollamiento trifásico. En general, esta representación consta de un bobinado equivalente por fase; sin embargo, la construcción de rotor de algunas máquinas es tal que su rendimiento es más preciso si se describe mediante la representación de cada fase con dos devanados equivalentes conectados en paralelo. Este tipo de máquina se refiere comúnmente como una máquina con rotor de doble jaula.

Se puede considerar también, que en la maquina asíncrona, los conductores del rotor están curvados. Lo que nos indica que los conductores no se colocan en el

Escuela politécnica Superior de Jaén

plano del eje de rotación del rotor, sino que por el contrario los conductores están doblados ligeramente con el eje de rotación. Al expresar las ecuaciones de tensión de la máquina de forma variable, es conveniente referirse a todas las variables del rotor para los devanados del estator por sus relaciones de transformación apropiadas:

$$i'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} i_{abcr} \quad (2.2.4-9)$$

$$v'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} v_{abcr} \quad (2.2.4-10)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad (2.2.4-11)$$

Tanto las inductancias de magnetización como las mutuas están asociadas con el mismo flujo magnético. De lo anteriormente dicho se deduce que ' L_{ms} ', ' L_{mr} ' y ' L_{sr} ' están relacionados. Dando lugar a:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (2.2.4-12)$$

Por consiguiente, se puede definir:

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.2.4-13)$$

Por consecuencia de lo anterior expresado ' L_{mr} ' puede expresarse como:

$$L_{mr} = \frac{N_r^2}{N_s} L_{ms} \quad (2.2.4-14)$$

Pudiéndose sustituir como:

$$L'_r = \frac{N_s^2}{N_r} L_r \quad (2.2.4-15)$$

A partir de la ecuación (2.2.4-7) se deduce:

$$L_s = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_s & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.2.4-16)$$

Donde:

$$L'_{lr} = \frac{N_s^2}{N_r} L_{lr} \quad (2.2.4-17)$$

Las uniones de flujo ahora pueden ser expresados como:

$$\frac{\lambda_{abcs}}{\lambda'_{abcr}} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ L'^T_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.2.4-18)$$

Las ecuaciones de voltaje expresadas en términos de variables de la maquina referidas al devanado del estátor ahora se pueden escribir como:

$$\frac{v_{abcs}}{v'_{abcr}} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ pL'^T_{sr} & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.2.4-19)$$

Siendo 'r_r':

$$r'_r = \frac{N_s^2}{N_R} r_r \quad (2.2.4-20)$$

2.4.2 Ecuación de par en máquinas variables

La evaluación de la energía almacenada en el campo de acoplamiento produce la expresión para la energía almacenada en un sistema magnético lineal. Está claro que la energía almacenada en las inductancias de fuga no es una parte de la energía almacenada en el campo de acoplamiento. Así, la energía almacenada en el campo de acoplamiento puede ser escrito como:

$$W_f = \frac{1}{2} i_{abcs}^T * (L_s - L_{ls}I) * i_{abcs}^T * L'_{sr} * i'_{abcr} + \frac{1}{2} * i'_{abcr}^T * (L'_r - L'_{lr}I) * i'_{abcr} \quad (2.2.5-1)$$

En dicha ecuación 'I' simboliza la matriz identidad. Previamente a expresar el par electromagnético conviene encarecidamente modificar las expresiones dadas en una máquina de polos. El cambio de energía mecánica en un sistema de rotación con una entrada mecánica puede ser escrito como:

$$dW_m = -T_e d\theta_{rm} \quad (2.2.5-2)$$

En la anterior ecuación el par electromagnético 'T_e' tiene sentido positivo por la acción del motor, el par tiene dirección hacia la salida del eje. La variable 'Θ_{rm}' representa el desplazamiento angular real del rotor. El flujo, corrientes, 'W_f', 'W_c' se expresan como funciones del desplazamiento angular 'Θ_r'. dando como resultado:

$$\theta_r = \frac{P}{2} \theta_{rm} \quad (2.2.5-3)$$

Siendo 'P' el número de polos de la máquina, por ende, se deduce:

$$dW_m = -T_e \frac{2}{P} d\theta_r \quad (2.2.5-4)$$

Consecuentemente para tener en consideración una máquina de 'P' polos todos los términos en el lado derecho deben ser multiplicados por 'P/2'. Como consecuencia de 'W_f = W_c', el par electromagnético puede ser evaluado a partir de:

$$T_e(i_j, \theta_r) = \frac{P}{2} \frac{\partial W_c(i_j, \theta_r)}{\partial \theta_r} \quad (2.2.5-5)$$

Si se pretende conseguir una forma abreviada es necesario usar las corrientes. Debido a 'L_s' y 'L_r' no son funciones de la variable 'θ_r', sustituyendo en 'W_f' en las ecuaciones anteriores (2.2.5-1) en (2.2.5-5) se obtiene el par electromagnético en Newton por metro (N*m)

$$T_e = \frac{P}{2} i_{abcs}^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] i'_{abcr} \quad (2.2.5-6)$$

La ecuación (2.2.2-6) pasa a ser:

$$\begin{aligned} T_e = -\frac{P}{2} * L_{ms} \left\{ \left[a_{as} \left(i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{cr} \right) \right. \right. \\ + i_{bs} \left(i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{cr} \right) \\ + i_{cs} \left(i'_{cr} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} \right) \left. \right] * \sin \theta_r \\ + \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{as}(i'_{br} - i'_{cr}) + i_{bs}(i'_{ar} - i'_{br})] \cos \theta_r \left. \right\} \end{aligned} \quad (2.2.5-7)$$

El par y la velocidad del rotor están relacionados por:

$$T_e = J \frac{2}{P} p \omega_r + T_L \quad (2.2.5-8)$$

La variable 'J' representa la inercia del rotor y en algunos casos la carga conectada. El conjunto del primer término del lado derecho es el par de inercia. En (2.2.5-8) las unidades de 'J' son kilogramos por metro al cuadrado (Kg*m²).

Frecuentemente se da a la inercia como una cantidad llamada ' W_{R2} ', para el sistema sajón, expresa en unidades de libras por pies al cuadrado (lbm – ft²). El par de carga ' T_L ' es positiva para una carga de par en el eje de la máquina de inducción.

2.3 Efecto de la temperatura en la eficiencia de los motores de inducción

En el interior de la máquina, los devanados estarán sometidos a temperaturas mucho mayores producto del confinamiento, ya que en ellos se produce la fuente de calor que se disipa hacia el ambiente. Esta temperatura puede superar fácilmente los 140°C y debe ser soportada sin problemas por las aislaciones de los devanados, típicamente barnices que, aplicados en una o dos capas, resisten elevadísimas temperaturas en algunos puntos localizados del devanado.

Aunque todos los motores incorporan sistemas de ventilación, por medio de ventiladores adosados al rotor que producen ventilación forzada de aire al interior de la máquina, éstos producen intercambio de calor hacia al ambiente por efectos de radiación, eliminando el exceso de calor en su interior y manteniendo la temperatura del motor dentro de parámetros de diseño. Las variaciones de temperatura influyen directamente sobre la temperatura de funcionamiento del motor.

En la actualidad, existen materiales aislantes y diseños que permiten que los motores puedan alcanzar hasta 90°C en las superficies de las carcasas. Esto queda limitado, en general, a las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiente de hasta 40°C.
- Variaciones de tensión menores a $\pm 10\%$ respecto de su tensión nominal.
- Variaciones de frecuencia menores a $\pm 5\%$ de su valor nominal.
- Variaciones simultáneas de tensión y frecuencia limitadas.
- Que la máquina opere a menos de 1.000 metros sobre el nivel del mar.
- Que las condiciones atmosféricas que rodean la máquina (polvo, humedad o gases, exposición a radiación solar directa, etc.) no interfieran seriamente en la ventilación normal del motor.

Si se exceden tales condiciones, se incrementará la temperatura de la superficie de la máquina por sobre el límite, lo que resultará en daño de la máquina o menor vida útil.

Asimismo, la condición de altitud en exceso de los 1.000 m.s.n.m. debe considerarse como un aumento de temperatura adicional de 1°C por cada 100 metros, lo que obliga a realizar una disminución de la potencia que es posible obtener en el eje del motor por efectos de instalaciones en altura.

2.4 El efecto de la altura en la eficiencia de los motores de inducción

En industria generalmente se fabrican los motores para trabajar por debajo de la cota de 1000 metros sobre el nivel del mar. Por tanto, se deben tomar consideraciones espaciales para la instalación de motores eléctricos por encima de dicha cota. Debido a que por encima de 1000 metros sobre el nivel del mar las capacidades de los motores se reducen, se realiza un derating (decremento o castigo) del motor.

Estos decrementos de la potencia de los motores se realizan por tres factores: la tensión aplicada, la altura de la instalación, y la temperatura. Cuando se permanece en una elevación por sobre un cierto límite inferior (establecido típicamente en 1.000 metros sobre el nivel del mar) existe el efecto de disminución de presión atmosférica por menor peso de la columna de aire. Esto produce dos efectos: la disminución de la tensión de ruptura de un aislante gaseoso, por efecto de la Ley de Paschen (donde la tensión de ruptura es función de la presión y la distancia interelectródica), y la disminución de la densidad del aire.

La ilustración 4 muestra la variación de la presión atmosférica terrestre en función de la altitud. La forma de variación es aproximadamente una exponencial decreciente respecto de la altura. Se aprecia que a una altura del orden de 5.000 metros sobre el nivel del mar. La presión atmosférica es aproximadamente la mitad que a nivel del mar.

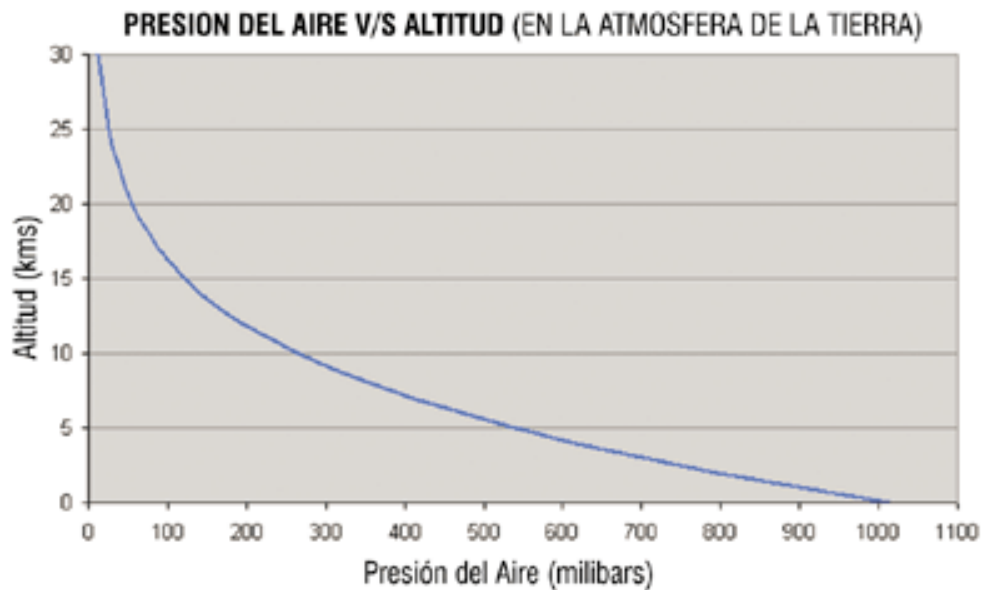


Ilustración 4 Gráfica de la presión del aire con respecto a la altitud

El aire tiene masa, y a nivel del mar es el equivalente a "una atmósfera" (753 milímetros de mercurio). Como la altura de la columna de aire disminuye cuando se aumenta la altitud, ésta "pesa menos" y se obtiene menor presión, tal como muestra la ilustración 5

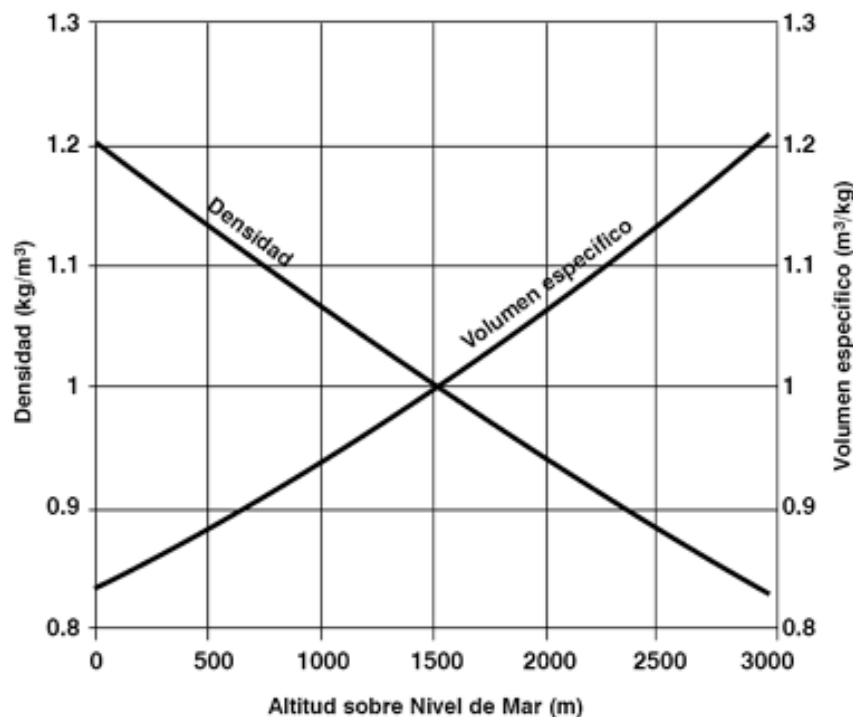


Ilustración 5 Gráfica de volumen específico/ densidad con respecto a la altitud

Un motor industrial genera calor debido a las pérdidas internas (roces, pérdidas Joule, pérdidas de hierro, pérdidas varias, etc), y necesita traspasar este calor hacia el

ambiente, por lo que precisa de una masa de aire frío que actúe como vehículo de esta transferencia de calor. Si tenemos un motor de inducción autoventilado, con un ventilador acoplado al eje del rotor, la potencia que se gasta en impulsar una masa de aire externo hacia el interior de la máquina es:

$$P_{ventilacion} = K * \rho_{aire} * n^3 \quad (2.4-1)$$

Siendo:

K es una variable que depende de la geometría del ventilador.

ρ_{aire} es la densidad del aire en la zona de trabajo

N es la velocidad de giro del rotor. Puesto que el ventilador gira solidario con el rotor de la máquina.

Se observa que esta expresión indica que existe proporcionalidad en la potencia requerida para ventilar una cierta masa de aire de refrigeración. Por ello se necesitará una menor potencia para impulsar aire si el motor gira a una misma velocidad en instalaciones de altura que a nivel del mar, por otra parte, como el aire será menos denso a una altura mayor, la masa de aire que se ingresa como medio de refrigeración de las masas de hierro y cobre del motor será menor. La velocidad no debiese cambiar notoriamente para una condición de carga constante e independiente de la altitud de montaje, dado que será principalmente función de la frecuencia y tensión de la red.

La paradoja se da en que, al enfriarse menos el motor, si bien se gastará menos potencia en ventilación (y se disminuirán con ello las pérdidas netas en la máquina), no se podrá exigir de él la misma potencia que a nivel del mar. Por esto, necesariamente habrá que "castigar" la potencia máxima que se podrá obtener del eje del motor si se instala la máquina a una gran altura, hablándose entonces del decremento (derating, en inglés) del motor. En la normativa europea este problema viene contemplado por lo que queda previsto el uso de un amplio abanico de carcasas que ayudan a evitar el problema del decremento de los motores en grandes altitudes.

Ha sido costumbre el aplicar factores de decremento de la potencia de los motores instalados en altura, considerando el factor de servicio. Esta práctica americana busca lograr una mayor potencia en el eje de un cierto motor por tiempo

indefinido, dado que la categorización de los "frames" o tamaños de carcasa en los estándares estadounidenses no resultan tan amplios como los establecidos en las normas europeas (IEC), y que esta práctica les permite a los diseñadores contar con potencias intermedias respecto de estas normas.

De esta forma, al instalar en altura un motor capaz de entregar una determinada potencia real a nivel del mar, sólo se podrá lograr una potencia menor debido a las limitaciones de temperatura máxima de sus devanados. Con ello, la carga real del motor será menor en altura que a nivel del mar, por lo que se tendrá que la eficiencia en ambos casos será diferente.

Si la máquina es calculada para lograr eficiencia nominal a nivel del mar, en una condición de funcionamiento en altura, como la carga será menor, la eficiencia estará comprendida entre la eficiencia nominal y la eficiencia máxima, siempre que no se aplique un factor de decremento que saque el punto de operación fuera de esta zona. En la ilustración 6, se muestra un ejemplo de las curvas de eficiencia y factor de potencia respecto de la variación de carga del motor.

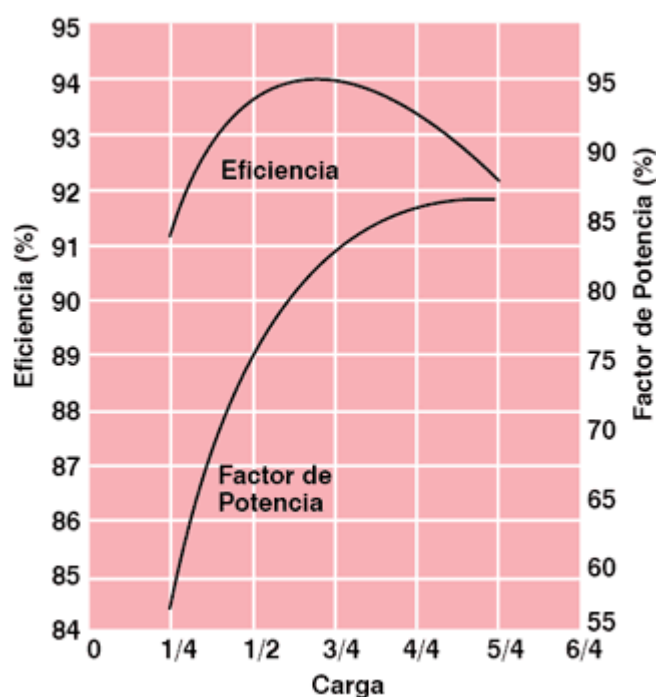


Ilustración 6 Curvas de eficiencia y factor de potencia en un motor de 22 kW

El decremento de temperatura con la altura de montaje será, sin embargo, un plus a favor del motor porque éste trabajará con temperaturas ambientales más frías que la del diseño del motor, pero ello dependerá de la condición de la instalación.

Por lo señalado, el uso de curvas de eficiencia en un rango amplio de cargas, y los efectos de menor ventilación y limitada capacidad de refrigeración, serán factores fundamentales para determinar exactamente el efecto de la altitud sobre el rendimiento de un motor determinado. Lo relevante es que, al momento de realizar evaluaciones de la conveniencia de reemplazar un motor de eficiencia "estándar" por otro de características de "alta eficiencia", podría haber sorpresas en los rendimientos finales de la nueva máquina respecto de la original.

2.6 Medidas para mejorar la eficiencia de un motor

El que un motor trabaje más frío, permite asegurar una larga vida útil, menores problemas de operación del proceso, menor tiempo de parada por reparaciones (que aumentan costos de las mismas al implicar mayor lucro cesante) y menor gasto innecesario de energía. Se puede plantear las siguientes acciones destinadas a mejorar la eficiencia de un motor de inducción:

- Alejar motores de fuentes de calor externas (hornos, radiación solar directa, etc).
- Mantener limpias las carcasas de las máquinas. El polvo, grasa y otros elementos dificultan la transferencia de calor desde la máquina al medioambiente.
- Mejorar los esquemas de lubricación de rodamientos y descansos (aumentar frecuencia de engrase, usar lubricantes de base sintética, atenerse a la viscosidad y consistencia de lubricantes recomendados por el fabricante, etc.)
- Mantener en buenas condiciones los ventiladores acoplados a los rotores.
- No permitir operaciones de motores con desequilibrios importantes de tensiones.
- Pintar las superficies de los motores con colores claros.
- Verificar si el motor usado es el más adecuado a la función requerida.
- En motores de gran potencia, evitar circulación de corrientes parásitas por descansos y rodamientos (usar descansos aislados).

- En casos extremos, ventilar de forma adicional el motor.

2.7 Ley de paschen

La ley de Paschen, llamada así en honor del físico alemán Friedrich paschen (1865-1947) que fue el primero en establecerla en 1889. Estudió la tensión disruptiva de láminas paralelas envueltas de gas como función de la presión y la distancia entre ellas. La tensión necesaria para crear un arco eléctrico a través del espacio entre láminas disminuyó a un punto a medida que la presión fue reducida. Luego, comenzó a aumentar, gradualmente excediendo su valor original. También encontró que, disminuyendo el espacio entre láminas a presión normal, causaba el mismo comportamiento en la tensión de ruptura.

Paschen encontró que la tensión disruptiva puede ser descrita mediante la ecuación:

$$V_{dis} = \frac{apd}{\ln(pd)+b} \quad (2.7-1)$$

Siendo:

V_{dis} la tensión disruptiva, medida en voltios.

p la presión, medida en atmosferas

d la distancia entre las láminas, medida en metros

a y b son constantes que dependen de la naturaleza y composición del gas.

Para el aire a presión atmosférica de una atmosfera, $a = 43.6 \times 10^6$ y $b = 12.8$, donde p es la presión en Atmósferas y d es la distancia de separación en metros.²

El gráfico de esta ecuación es la curva de Paschen. Ésta predice la existencia de una tensión disruptiva mínima para un determinado producto de la presión y la separación. El mínimo citado para presión atmosférica y una separación de 7.5 micrómetros es de 327 Voltios. En este punto, la intensidad del campo eléctrico en Voltios/metros es alrededor de unas 13 veces mayor que la necesaria para superar una brecha de un metro. El fenómeno está bien verificado experimentalmente y es conocido como el mínimo de Paschen. La ecuación falla para distancias menores de

pocos micrómetros a una Atmósfera de presión y predice incorrectamente un arco infinito de voltaje en la distancia de 2.7 micrómetros.

CAPITULO TRES

normativa

3.1 Influencia de la temperatura en el desempeño del motor de inducción, condicionamiento de la potencia mecánica en el eje.

Las potencias útiles o disponibles en el eje están seriamente ligadas a la influencia de la temperatura, la cuales están determinadas por una característica térmica. En el presente trabajo de fin de grado se abordará esta problemática con el fin de dilucidar la verdadera potencia útil, disponible en el eje de la maquina en función de los parámetros que determina su rendimiento térmico.

Ha de considerarse previamente cuales son los puntos más débiles de la maquina desde el punto de vista térmico, dando lugar al siguiente estudio y análisis de como varían la potencia útil del motor en función de la temperatura ambiente.

En el caso del presente trabajo se han realizado casos prácticos con motores ABB presentes en el laboratorio de motores eléctricos presente en el edificio de la escuela politécnica superior de Jaén.

3.1.1 Introducción.

Los motores de inducción debido a sus características están muy extendidos en las aplicaciones industriales. Entre los motores eléctricos empleados destaca muy por encima del resto de máquinas eléctricas, el motor eléctrico de inducción o también denominado motor asíncrono con rotor en jaula de ardilla. Debido a la incertidumbre y la variedad plausible en las cargas de trabajo, como en cualquier tipo de aplicación, de forma usual se usan como parámetros de selección en las diferentes aplicaciones los datos de las placas de características y/o datos de catálogo, como criterio de selección en el rango de aplicaciones. Como resultado nos da que estos datos son los adecuados cuando en la aplicación concurren unas determinadas condiciones. Sin embargo, cada aplicación tiene sus características particulares que hacen que los datos del catálogo o la placa de características sean realmente los apropiados o no lo sean. Casi todos estos datos informativos vienen ajustados teniendo en cuenta el punto térmico de funcionamiento del motor, que es el que viene a determinar la vida media de la máquina eléctrica. Como criterios en la elección de las maquinas asíncronas, cabe mencionar:

- Rango de aplicación. Que no es más que la utilización en un régimen no continuo de trabajo, como sucede en infinidad de procesos de aplicación.

- Temperatura máxima ambiental. Esta determina el mínimo salto térmico entre el motor y el medio que lo rodea, lo que condiciona la temperatura de funcionamiento.
- Densidad del aire. Que determina la capacidad de evacuación de calor del motor. Esta densidad del aire puede ser diferente según la altitud (sobre el nivel del mar) de la aplicación del motor.
- Grado de protección (IP) del motor. Que también determina como se transfiere el calor desde el interior del motor hacia el medio ambiente.
- El tamaño del motor. Este determina la superficie útil de transferencia de calor entre la máquina y el exterior.
- Tipo de aislante. Este parámetro fija la temperatura máxima que puede alcanzar una máquina sin que se deteriore de forma acelerada.

Todos estos aspectos se necesitan tener en cuenta al utilizar un motor eléctrico o cualquier máquina eléctrica ya que tienen una relación directa con la temperatura de funcionamiento y con la vida media del motor, lo que acaba modificando los valores de trabajo del motor con respecto a los reflejados en las hojas de catálogos y/o placa de características. los tipos de exigencias que tengamos para el tipo de trabajo que va a realizar nuestra máquina de inducción, condicionara el estudio y la prevalencia de los anteriores aspectos mencionados.

3.1.2 Importancia del rendimiento en los motores de inducción

Los motores eléctricos, en la industria y en el sector terciario, consumen gran parte de la energía eléctrica en el mundo. Son los responsables de la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica, y pequeñas mejoras en su eficiencia pueden generar un ahorro importante en costes de energía. He aquí algunas sugerencias:

- Utilizar motores de elevado rendimiento. Para una misma potencia, puede haber diferencias en la eficiencia entre un 3% y un 8% de un motor a otro.
- Seleccionar adecuadamente la potencia del motor según los requerimientos de la carga, siendo conveniente trabajar entre un 75% y un 100% de plena carga. Para índices de carga inferiores al 75%, el rendimiento del motor disminuye considerablemente.

-Usar variadores de velocidad donde sea apropiado, para ajustar la velocidad y el par a los requerimientos de la carga. Es especialmente interesante su utilización para el ahorro energético en el caso de bombas y ventiladores.

-Programar correctamente las operaciones de mantenimiento y reparación. Un adecuado mantenimiento ayuda a minimizar pérdidas por rozamiento y calor, consiguiendo además alargar la vida útil del motor.

Bajo este potencial de ahorro y mejora del medio ambiente, diferentes países han desarrollado políticas energéticas para incentivar el uso de motores eléctricos de elevado rendimiento. En la Comunidad Europea se han establecido diferentes categorías de motores atendiendo a su rendimiento (Eff1, Eff2 y Eff3) ilustración 7

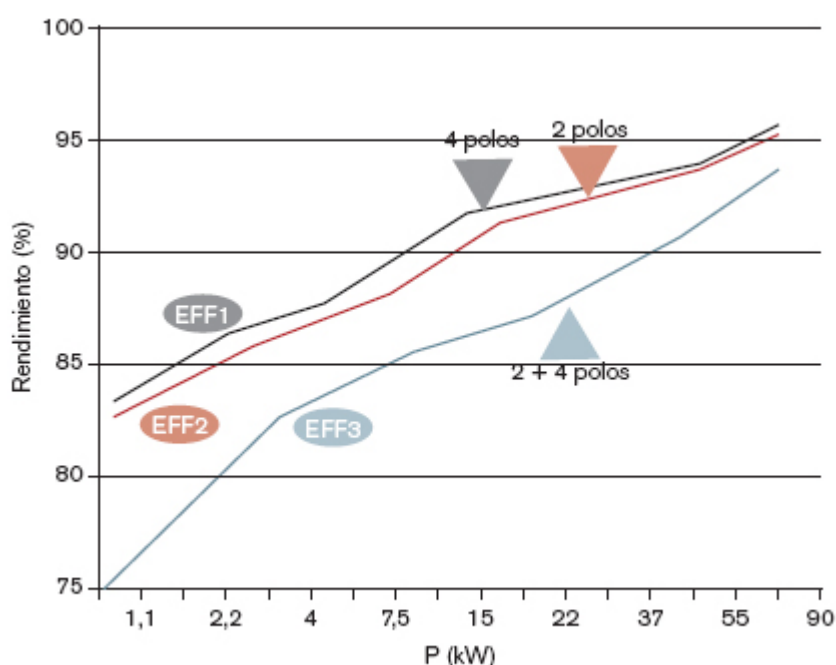


Ilustración 7 Rendimiento de los motores en las categorías Eff1, Eff2 y Eff3 (hasta 80kW)

Los diferentes niveles y categorías en cuanto a la eficiencia de los motores de inducción no están armonizados. Así pues, nos encontramos con diferentes categorías según el país, cuestión que genera confusión e incrementa las barreras del mercado a los fabricantes, además de problemas de adaptación. Por este motivo, la IEC (International Electrotechnical Commission) ha desarrollado una clasificación para armonizar los diferentes requerimientos de los motores atendiendo a su eficiencia, a partir de la norma IEC 60034-30, propuesta que clasifica los motores en las categorías IE4, IE3, IE2 (equivalente a Eff1) e IE1 (equivalente a Eff2)⁵. El ámbito de aplicación

afecta a motores de inducción trifásicos hasta 1.000 V, con potencias comprendidas entre 0,75 kW y 370 kW, con 2, 4 y 6 polos.

3.1.3 Pérdidas y rendimiento en un motor de inducción

De forma sencilla el rendimiento de un motor eléctrico se define como la medida de la capacidad que tiene el motor para convertir la energía eléctrica en energía mecánica. En el proceso de conversión se presentan pérdidas (de diferente naturaleza, electromagnéticas o mecánicas), por lo que se determina el rendimiento de un motor a partir de:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = 1 - \frac{P_{perdidas}}{P_{absorvida}} \quad (3.1.3-1)$$

Las pérdidas que aparecen en el motor de inducción son:

- Pérdidas eléctricas (pérdidas por efecto Joule): Son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por las bobinas y se incrementan rápidamente con la carga del motor. Aparecen como consecuencia de la resistencia eléctrica de los bobinados del estator (P_{cu1}) y de las barras conductoras del rotor (P_{cu2}).
- Pérdidas magnéticas: Se producen en los núcleos de chapa magnética del estator y del rotor, debidas al ciclo de histéresis y a las corrientes de Foucault (P_{fe}). Dependen básicamente de la frecuencia y de la inducción, por lo que prácticamente son independientes del índice de carga.
- Pérdidas mecánicas: Son debidas a la fricción entre rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y otros elementos rotativos del motor (P_{freg}). Dependen de la velocidad, por lo que en el motor de inducción alimentado desde la red se consideran prácticamente constantes.
- Pérdidas adicionales en carga: Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se supone que varían con el cuadrado del par de salida (P_s). La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja influyendo, entre otros, el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras, la relación entre el número de ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones de superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

A modo de ejemplo, podemos ver la distribución de pérdidas obtenida a partir de ensayos en un motor de inducción de 1,5 kW (potencia equivalente a uno de los motores ensayados), presentando en la ilustración 8 la distribución de pérdidas en el punto de funcionamiento nominal y en la ilustración 9 la evolución de las pérdidas en relación con la fracción de potencia útil desarrollada por el motor.

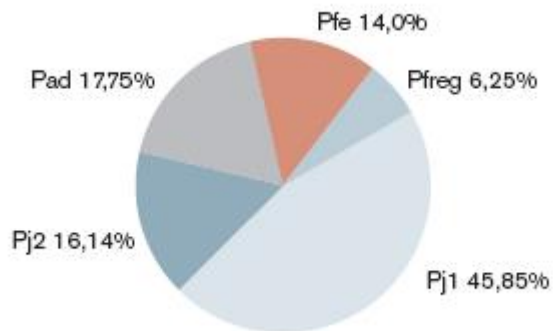


Ilustración 8 Distribución de pérdidas (%) en un motor de 1,5kW (condiciones nominales)

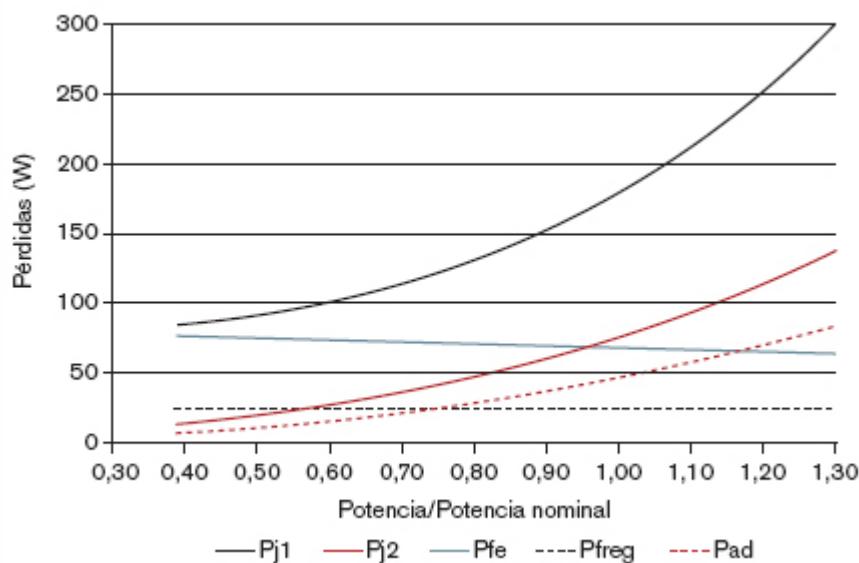


Ilustración 9 Distribución de las pérdidas de un motor de 1,5kW en función de la fracción de potencia

3.2 Normativa

3.2.1 Norma IEC 60034-2-1

La norma IEC 60034-2-1, editada en el año 2007, reemplaza a la IEC 60034-2 (1996) adoptada como norma UNE. La nueva edición del año 2007 todavía no se ha adoptado como norma UNE pero probablemente se hará en breve.

Esta última edición de la norma europea presenta grandes similitudes con la norma americana, principalmente en la forma de la determinación de las pérdidas adicionales en carga y en la inclusión de nuevos procedimientos para su determinación, procedimientos que no están incluidos en la edición de 1996.

Esta norma incluye varios métodos y procedimientos para la determinación del rendimiento, indicados en la tabla 1, donde se destaca la necesidad característica básica de equipamiento en cada método.

MÉTODOS	NECESIDAD BÁSICA
Métodos directos:	
Medida directa del par	Freno y medidor de par hasta plena carga
Máquina calibrada	Otra máquina completamente calibrada
Back-to-back, doble alimentación	Dos máquinas idénticas
Métodos de las pérdidas totales:	
Método calorimétrico	Envoltura térmica específica
Back-to-back, simple alimentación	Dos máquinas idénticas, de rotor bobinado
Suma de pérdidas, con medida del par:	
Pérdidas adicionales en carga a partir de la separación de pérdidas	Freno y medidor de par hasta un 25% superior a plena carga
Suma de pérdidas, sin medida del par:	
Pérdidas adicionales en carga asignadas	Medidor de potencias
Rotor desmontado y ensayo de rotación inversa	Motor auxiliar, de potencia inferior a 5 veces las pérdidas del motor a ensayar
Eh-Star	Resistencia para una corriente un 50% superior a la de plena carga
Circuito equivalente	Sistema de bloqueo del rotor

Tabla 1 Métodos de determinación para el rendimiento, según norma IEC 60034-2-1.

De entre todos estos métodos, he estudiado los siguientes:

- Método directo con medida del par, designado por la norma como preferente en potencias inferiores a 1 kW.

- Suma de pérdidas con medida del par, designado por la norma como preferente en potencias comprendidas entre 1 kW y 150 kW.
- Suma de pérdidas sin medida de par, con las pérdidas adicionales en carga asignadas.

En la aplicación de todos los métodos anteriores, la norma especifica las necesidades siguientes por lo que a precisión de las medidas se refiere:

- Precisión de los aparatos de medida: 0,2%.
- Precisión en las medidas de par: 0,2% (debe corregirse la medida del dinamómetro, si es necesario).
- Precisión en las medidas de frecuencia: 0,1%.
- Precisión en las medidas de resistencia: 0,2%.
- Precisión en las medidas de velocidad: 0,1% o 1 rpm.
- Precisión en las medidas de temperatura: 1 °C.

En todos los ensayos donde sea necesario medir la resistencia del estator se debe proceder como sigue. Medir la resistencia entre los bornes de línea de conexión del motor y, según la conexión, la resistencia de fase será:

- Conexión en estrella: $R_{\text{fase}} = 0,5 R_{\text{medida}}$
- Conexión en triángulo: $R_{\text{fase}} = 1,5 R_{\text{medida}}$

Para determinar la temperatura de funcionamiento a la que debe referirse la resistencia, debe usarse alguno de los métodos siguientes (por orden de preferencia):

- Temperatura determinada en el ensayo de resistencia a plena carga (norma 60034-1)4.
- Temperatura medida directamente mediante sonda o termopar.
- Temperatura determinada en el ensayo de resistencia a plena carga en una máquina idéntica.
- Asumiendo la temperatura según la clase de aislamiento (Clase B = 95 °C, Clase F = 115 °C, Clase H = 135 °C).

3.2.2 Método directo con medida del par

Mediante ensayo en carga, debe medirse:

- La potencia eléctrica absorbida (P_{abs}).

-El par de salida (T) y la velocidad (n).

Se calculan directamente la potencia útil (P_u) y el rendimiento (η):

$$P_u = T \Omega \quad (3.2.2-1)$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (3.2.2-2)$$

En la que Ω representa la velocidad en radianes segundo (rad/s). hay que aclarar si es necesario la medida de par debe corregirse por la acción del dinamómetro.

3.2.3 Suma de pérdidas con medida del par

El procedimiento para la obtención del rendimiento mediante el método de suma de perdidas con par es el siguiente:

-Determinación de las perdidas constantes (P_{ctn}). Engloban las perdidas en el hierro (P_{fe}) y las perdidas por rozamiento más ventilación (P_{freg}). Las perdidas constantes deben ser representadas en una gráfica, en función de la tensión aplicada en el ensayo de vacío al cuadrado (U_0^2). El objetivo es hallar el punto de corte con el eje de ordenadas de la recta de regresión que se obtiene, el cual es la pérdida buscada ilustración 10.

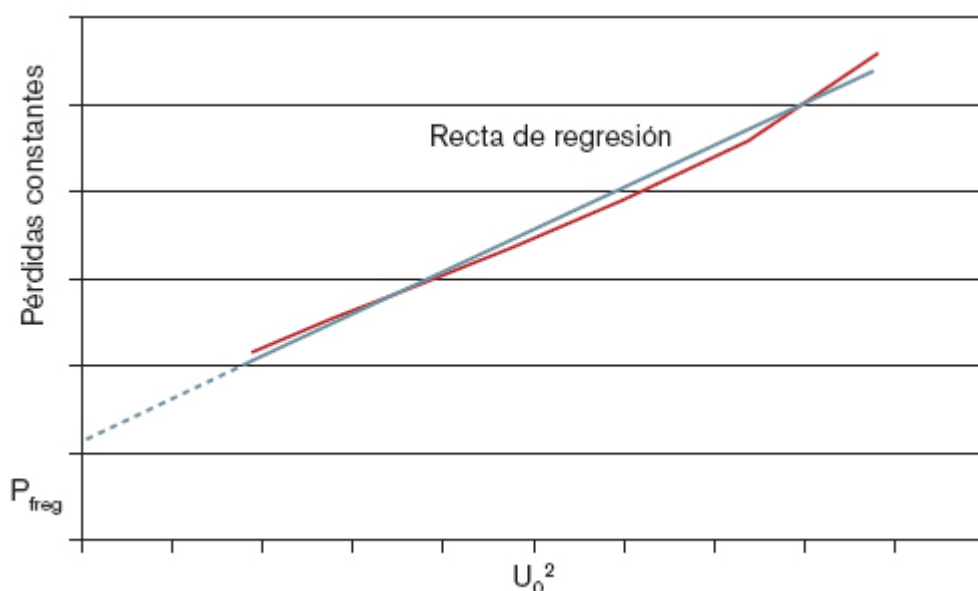


Ilustración 10 Determinación de las perdidas por rozamiento + ventilación

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro (P_{fe}) es necesario representar en primer lugar, realizando primeramente el ensayo de vacío y teniendo sus datos, las pérdidas obtenidas ($P_{fe} = P_{ctn} - P_{freq}$) en función de la tensión aplicada (U_0) ilustración 11.

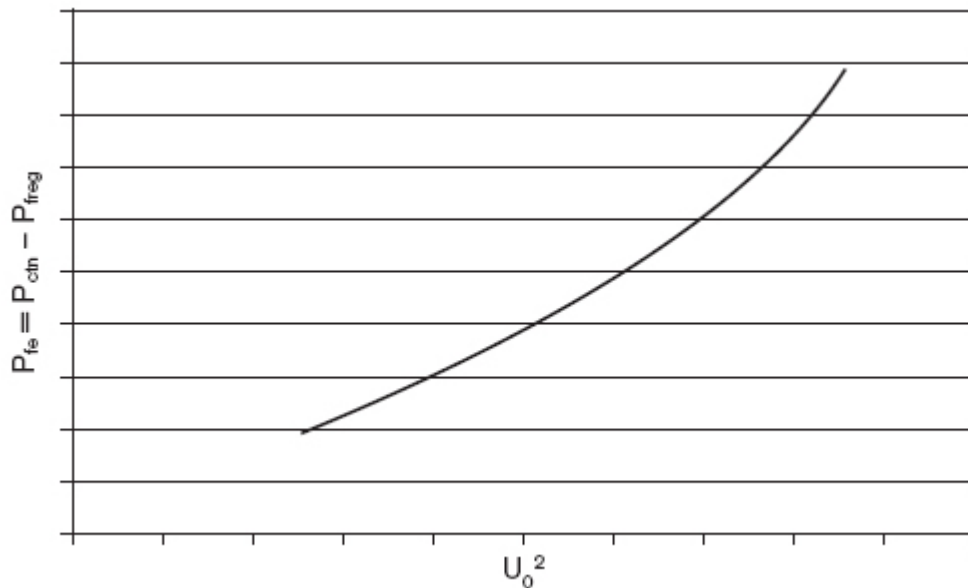


Ilustración 11 Gráfica para la determinación de las pérdidas en el hierro

Las pérdidas en el hierro, para los diferentes puntos de carga, se obtienen a partir del cálculo de la tensión U_r utilizando la ecuación siguiente (3.2.3-1), donde los valores de tensión, corriente, resistencia y ángulo son los correspondientes al punto de carga en cuestión. Entrando en la ilustración 11 por el valor de U_r se obtienen las correspondientes pérdidas en el hierro para el punto de carga.

$$U_r = \sqrt{\left(U - \left[\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \cos \phi \right] \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \sin \phi \right)^2} \quad (3.2.3-1)$$

Determinación de las pérdidas de carga. Se obtienen a partir del ensayo en carga, con seis valores de carga diferente, incluida la carga nominal. Durante el ensayo, la temperatura debe ser próxima a la temperatura de referencia del motor. Con el fin de hallar las pérdidas por efecto joule en el estator (P_{cu1}) se emplea la ecuación:

$$P_{cu1} = 3R_{fase} * I_f^2 \quad (3.2.3-2)$$

Siendo R_{fase} la resistencia de fase a la temperatura de cada punto del ensayo e I_f la corriente de fase en cada punto.

Las pérdidas Joule en el rotor (P_{j2}) se calculan a partir de:

$$P_{cu2} = (P_{ab} - P_{cu1} - P_{fe}) * S \quad (3.2.3-3)$$

Siendo P_{ab} la potencia absorbida y s el deslizamiento para cada punto del ensayo. El deslizamiento debe corregirse a la temperatura del ensayo.

Determinación de las pérdidas adicionales en carga. Se calculan a partir del ensayo en carga, con la medida del par en cada uno de los puntos del ensayo. Una vez determinadas las pérdidas conocidas en cada punto, se determinan las pérdidas residuales (P_{res}) a partir de

$$P_{res} = P_{ab} - P_u - P_{cu1} - P_{cu2} - P_{fe} - P_{freg} \quad (3.2.3-4)$$

Se representan las pérdidas residuales gráficamente en función del cuadrado del par. La pendiente de la regresión lineal obtenida (A), tal como se indica en la imagen 3.6, será el parámetro a utilizar en el cálculo de las pérdidas adicionales en carga a partir de la siguiente ecuación, siendo T el par del punto de carga a calcular

$$P_{ad} = A * T^2 \quad (3.2.3-5)$$

Finalmente, el rendimiento se calcula a partir de la ecuación (3.2.3-6).

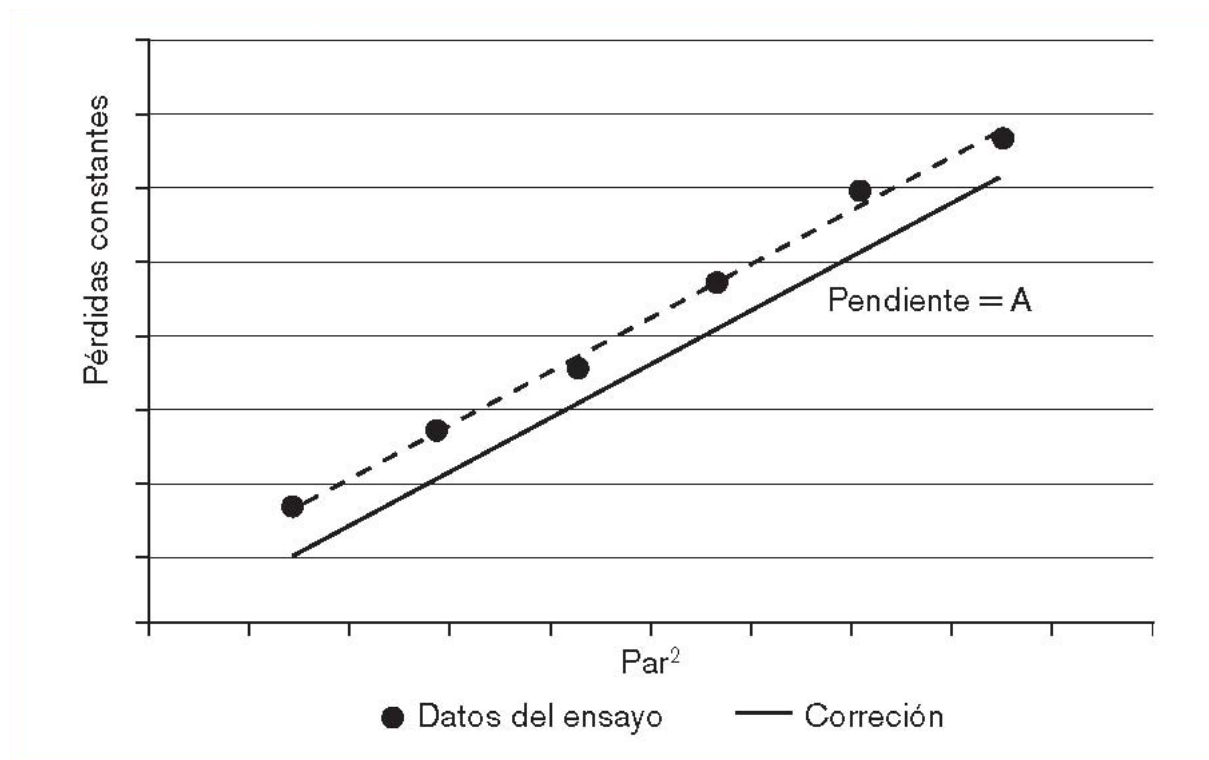


Ilustración 12 Recta de perdidas residuales

$$\eta = \frac{P_{ab} - P_{perdidas}}{P_{ab}} \quad (3.2.3-7)$$

3.2.4 Suma de pérdidas sin medida del par

El siguiente método descrito es el seguido en los ensayos realizados en el presente trabajo de fin de grado. Este método resulta apropiado cuando podemos realizar el ensayo en carga, pero no disponemos de medidos de par. Se calculan las pérdidas Joule, en el hierro y mecánicas, igual que en el caso anterior. Se determinan las pérdidas adicionales a plena carga en porcentaje respecto de la potencia absorbida, según las relaciones indicadas en la ilustración 13, donde:

$P_u \leq 1 \text{ kW}$	$P_{ad} = P_{ab} \quad 0,025$
$1 \text{ kW} < P_u < 10.000 \text{ kW}$	$P_{ad} = P_{ab} \cdot [0,025 - 0,005 \log_{10} (P_u/1 \text{ kW})]$
$P_u > 10.000 \text{ kW}$	$P_{ad} = P_{ab} \quad 0,005$

Ilustración 13 Asignación de las pérdidas adicionales en carga, según la potencia del motor

La corrección de estas pérdidas adicionales para puntos de carga diferentes del nominal ($P_{ad'}$), se realiza a partir de la ecuación.

$$P_{ad'} = P_{ad} * \frac{I_1^2 - I_0^2}{I_{1n}^2 - I_0^2} \quad (3.2.4-1)$$

Siendo

I_1 la corriente absorbida en el punto de carga.

I_{1n} la corriente absorbida en condiciones nominales.

I_0 la corriente absorbida en vacío.

La determinación de las pérdidas adicionales en carga nominales puede realizarse también a partir del método Eh-Star, o bien, a partir del método con rotor desmontado y ensayo de rotación inversa. Para su corrección a otros puntos de carga se hace también a partir de la ecuación (3.2.4-1).

Una vez determinadas todas las pérdidas, el rendimiento se calcula a partir de la ecuación (3.2.3-7), como en el método descrito anteriormente.

3.3 Consideraciones de utilización y aprovechamiento

Se estima que la vida media de un motor asíncrono de rotor jaula dispone de una vida media útil de 40 años. Un porcentaje muy alto de averías y destrucción de este tipo de máquinas es de carácter térmico, siendo los aislantes los que normalmente sufren las primeras consecuencias de este deterioro. Otra de las causas importantes (en el entorno de un 20%) de avería es de tipo mecánico, fundamentalmente por agotamiento o deterioro de los rodamientos, que son causados por desajustes en la lubricación y por fallos en la alineación de las transmisiones, ambos acaban generando desequilibrios en los esfuerzos mecánicos soportados. En el caso de avería de carácter térmico, que es sin duda el más preocupante el motor sufre un deterioro, tanto más rápido cuanto mayor es el exceso de temperatura. De modo empírico y aproximado, se puede establecer una relación entre la duración o vida útil del aislante.

$$D = a * e^{\frac{b}{t}} \quad (3.3-1)$$

Siendo:

D la vida útil del aislante

t la temperatura

a constante propia del material

b constante propia del material

Por otro lado, se conoce que las variaciones de temperatura que experimenta el motor **no** son instantáneas, dependen asimismo de las capacidades térmicas de los materiales que lo componen. La evolución se representa en la ilustración 14 y la expresión que rige el calentamiento en la ecuación (3.3-2):

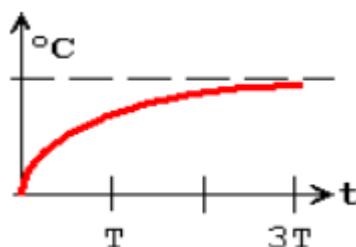


Ilustración 14 Evolución de la temperatura

$$Q_1 - Q_E = M * C_e * \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} \quad (3.3-2)$$

Siendo:

Q_1 el calor interno generado

Q_E es el calor evacuado

M la masa propia del motor

C_e el calor específico

σ el incremento de la temperatura respecto al ambiente.

Una vez indicados que los parámetros térmicos son los que van a determinar el límite de funcionamiento del motor para que no tenga un envejecimiento prematuro, vamos a ver una serie de valores que pueden influir en el comportamiento térmico del motor: El primero a tener en cuenta es el relativo a de la “clases de servicio” parámetro muy importante pero que queda fuera del presente trabajo de final de grado. Otros de los valores más representativos de los indicados, se tratan en los siguientes apartados.

3.3.1 Límite de seguridad térmica y la evolución con respecto al tamaño y potencia

Realmente el límite térmico del motor se encuentra en los aislantes. Estos son sin duda la parte más débil de la máquina (térmicamente hablando), por lo tanto ellos son los que limitan la seguridad térmica, y establecen que la máxima temperatura que alcanza el motor no debe superar la temperatura máxima del aislante. La temperatura límite permisible del aislante depende de la calidad del mismo (ver estos límites en la tabla 2). Evidentemente, cuanto mejor sea la clase de aislamiento, mayor coste tiene el motor. Según la norma UNE 21-304:

Clase de aislamiento	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatura límite en °C	90	105	120	130	155	180	>180

Tabla 2 Valores de la temperatura según el tipo de aislante

Sin embargo, cuanto mayor sea la temperatura límite del aislante, mayor potencia nominal puede proporcionar una misma máquina. O bien, para una potencia nominal dada, menor será su tamaño. De hecho, la continua mejora tanto de las Escuela politécnica Superior de Jaén

características térmicas de los aislantes como de los métodos de refrigeración ha permitido la siguiente evolución en la potencia de una máquina con una determinada carcasa (NEMA 404).

Años	1898	1903	1905	1914	1924	1929	1940	1956	1961	1966	1978	1985
Pot. Nom. (C.V)	7,5	10	15	20	25	30	40	50	60	100	115	125

Tabla 3 Evolución de la potencia de un motor para un determinado tamaño

En la tabla 3, se observa la importancia que ha tenido, en la evolución del motor asíncrono a lo largo del tiempo, el tratamiento de la característica térmica de este tipo de máquinas, ya que para un mismo tamaño la potencia se ha multiplicado prácticamente por 15. El éxito ha radicado tanto en la mejora de los aislantes como en la evolución de las características de los sistemas de ventilación y transmisión de calor.

3.3 2 Influencia de la temperatura ambiente

Si se analiza la ecuación (3.3-2) se llega a la deducción de que hay muchas variables que inciden en el calentamiento del motor. Algunas de ellas han quedado incluidas en el análisis del apartado anterior, que han permitido la evolución entre la relación entre la potencia y el tamaño, pero tanto antes como ahora hay otros datos que también son importantes, tal como es la temperatura ambiente. A partir de la ecuación (3.3-2), tomando como constantes todas las variables excepto la temperatura ambiente y el valor de la potencia nominal, y sabiendo que, según la Norma, para obtener los valores nominales de trabajo (que son los que nos ofrecen los catálogos y/o placa de características), el valor de temperatura tomado es el de 40°C como máximo, en la tabla 4, se aporta la evolución de la potencia nominal en función de la temperatura ambiente. En la gráfica de la ilustración 15, se puede observar la evolución mencionada.

Tª ambiente (°C)	<30	30 a 40	45	50	55	60
Potencia admisible en %de la nominal	107%	100%	96%	92%	87%	82%

Tabla 4 % de potencia disponible

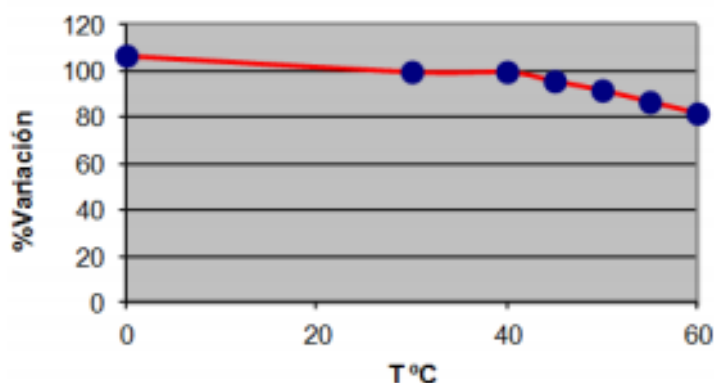


Ilustración 15 Relación entre t° y P_n ante los incrementos de temperatura

3.3.3 Influencia de la altitud sobre el nivel del mar de la aplicación

En los ensayos para mi trabajo de fin de grado no he tenido en cuenta la altitud debido a la incapacidad para ensayar en distintas altitudes. La composición del aire no es homogénea, si no que depende de la altitud, entre otras razones debido al valor de la presión atmosférica, que va disminuyendo con la altitud. La ecuación (3.3-2) está deducida para valores de elevación de hasta 1.000 metros sobre el nivel del mar, donde la variación de la presión, y su repercusión sobre las características del aire, son pequeñas. Conocido que las características térmicas son las que limitan la potencia del motor. Es muy importante a tener en cuenta, en la elección del motor, la citada altitud de la aplicación. Ante la escasez de datos objetivos que permitan la corrección de los parámetros de catálogos y/o placas de características, la normativa sobre las aplicaciones de motores, establecen unos correctores que permiten adecuar los valores característicos de altitudes convencionales a otras aplicaciones. Así en la table 5 y en la gráfica de la ilustración 16, se tiene los valores de ajuste y su evolución, en función de la altitud.

Altitud (metros)	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
Potencia admisible en % de la nominal	100%	97%	94%	90%	86%	82%	77%

Tabla 5 Relación entre altitud y potencia nominal del motor

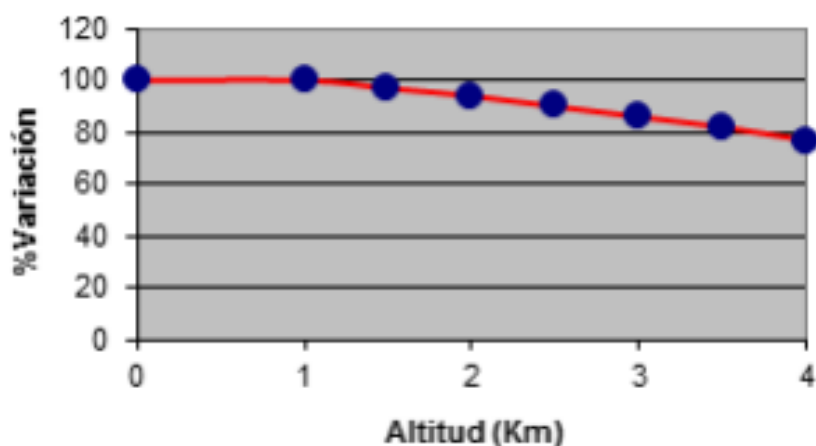


Ilustración 16 Relación grafica entre altitud y potencia nominal del motor

Como se puede observar en ambas representaciones, la altitud fija una reducción de la potencia nominal o máxima en régimen de trabajo denominado continuo, pudiendo llegar esta a provocar una disminución de hasta un 23 % de la potencia disponible en un motor. La importancia de este tipo de rectificaciones, viene dada por la gran cantidad de aplicaciones en las que la altitud esté por encima de estos 1.000 metros mencionados. Solo hay que recordar que hay infinitas ciudades en todo el mundo con cotas de altitud bastante mayores, y si además se consideran aplicaciones tales como los remotes de estaciones de esquí, ascensores en hoteles de estas estaciones de esquí, etc., el conocimiento de estas consideraciones es esencial.

3.4 Limite mecánico del motor eléctrico de inducción

Cabría pensar si los análisis efectuados en los apartados anteriores pueden incidir sobre la potencia mecánica a desarrollar por el motor. Por tal motivo volviendo a estudiar de nuevo a la Norma, pero ahora atendiendo a la disponibilidad mecánica de un motor, se puede comprobar que según la norma VDE 0530 (norma alemana de aplicación en toda Europa) se especifica lo siguiente:

“los motores eléctricos polifásicos de inducción deben ser sobrecargables hasta 1,6 veces el par nominal durante 15 segundos, a baja tensión y frecuencia nominal, independientemente de su clase de servicio y ejecución”

Como los datos del catálogo están referidos a una serie de fabricación de motores, siendo cada uno diferente a cualquier otro, la norma obliga a que los datos

de catálogo y/o placa de características, estarán sometidos a una tolerancia del 10%, así, por ejemplo, la relación entre el par máximo del motor y el par mecánico de la carga que resulta de la aplicación del criterio anterior es:

$$\frac{T_{max}}{T_{carga\ max}} \geq \frac{1'6}{0'9} = 1'8 \rightarrow P_{carga\ maxima} = T_{carga\ max} * \omega_{nom} \quad (3.4-1)$$

$$\leq \frac{T_{max}}{1'8} * \omega_{nom}$$

$$P_{nom} = T_{nom} * \omega_{nom} \quad (3.4-2)$$

$$P_{carga\ max} \leq \frac{T_{max}}{1'8 T_{nom}} * P_{nom} \quad (3.4-3)$$

El anterior grupo de ecuaciones es la definición de la potencia mecánica interna. Por tanto, la potencia mecánica máxima que puede proporcionar el motor respecto a la nominal que figura en su placa de características. Considerando como criterio base la sobrecarga impuesta por la norma es:

$$P_{carga\ max} \leq \frac{T_{max}}{1'8 * T_{max}} * P_{nom} \quad (3.4-4)$$

La anterior ecuación define la potencia mecánica máxima en función de la nominal. Representando a efectos prácticos implica que un motor con un par máximo superior a 1'8 veces el nominal podría dar una potencia mecánica superior a la que viene especificada en su catálogo. A título de ejemplo, para algunos motores resultan las siguientes potencias mecánicas máximas para algunos casos de la tabla siguiente:

P_{Nominal}	T máximo/T nominal	$P_{\text{Mecánica-Máxima}}$	% incremento
0.06	2	0.07 Kw	11%
1'5	2'8	2'33 Kw	55%
4	3	6'7 Kw	66%
15	3'2	26'7 Kw	77%
45	3'3	82'5 Kw	83%
250	2,8	389 Kw	55%
1000	2,6	1444 Kw	44%

Tabla 6 Posible incremento de la potencia disponible en un motor

Como caso particularmente y significativo, cabe observar que un motor de 45 kW. de potencia nominal podría suministrar hasta 82'5 kW., sin superar el límite de sobrecarga impuesto por la norma. ¿Por qué, en ese caso, el fabricante limita voluntariamente la potencia del motor hasta tal extremo? Porque interviene una segunda limitación de la potencia basada en factores térmicos, ya estudiados en los apartados anteriores.

3.5 Obtención de los datos

Con el fin de analizar la relación entre la temperatura ambiente y el rendimiento del motor se he diseñado dos ensayos propios. Ante la falta de un proceso estipulado en alguna normativa. Para intentar que fuera lo más homogéneo posible me he orientado en la norma UNE-EN 60034-28 de diciembre del 2013 (maquinas eléctricas rotativas. Parte 28: métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión. Correspondiente con la norma internacional IEC 60034-28:2012), la norma UNE-EN 60034-2-1 de octubre del 2009 (maquinas eléctricas rotativas: parte 2-1: métodos normalizados para la determinación de las perdidas y del rendimiento a partir de ensayos) y UNE-EN 60034-30 de abril del 2010 (máquinas

eléctricas rotativas: parte 30: clases de rendimiento para motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única).

Los motores usados para los ensayos han sido tres motores trifásicos de distintas potencias asignadas: 1'5kW, 2'2kW y 3kW respectivamente.

3.5.1 Equipo de medida usados

Para la realización de los diferentes ensayos descritos en las normas anteriormente citadas, se ha dispuesto de los siguientes equipos de medida.

Multímetros:

Utilizado para la medición de intensidades y tensiones con rango de hasta 1000 V y rango de intensidad de hasta 10 A.



Ilustración 17 Multímetro AMPROBE 33XR-A



Ilustración 18 Multímetro MY64

Analizador de redes:

Usado para medir las potencias consumidas (kW, kva, kvar) de la red por el motor, así como su factor de potencia ($\cos \phi$).



Ilustración 19 Analizador de redes fluke 434b

Termómetro infrarrojo:

Para medir la temperatura del motor.



Ilustración 20 Termómetro infrarrojo fluke 65

Termómetro:

Para medir la temperatura ambiente de la sala de trabajo.



Ilustración 21 Termómetro digital

3.6 Descripción de los ensayos

En general ambos ensayos requieren de los mismos ajustes y aparatos necesarios. En ambos ensayos se trata de acoplar los motores a una dinamo freno de potencia 5KW, de forma que se pudiera analizar bajo distintas condiciones de carga. Fruto de los ensayos realizados en diferentes condiciones y repetidos un amplio número de veces, se comprobó cómo los valores eran reiterados pese haber variaciones de temperatura ambiente. Explicándose mejor las fluctuaciones por el tipo de banco usados o los armónicos producidos o llegados al motor desde la red. Con lo cual se registraron los valores de potencia, tensión, intensidad y factor de potencia en las distintas cargas y temperaturas analizadas.



Ilustración 22 Dinamo-freno usada para los ensayos

3.6.1 Aparatos de medida para magnitudes eléctricas, velocidad y frecuencia

Los aparatos de medida deben ser de clase de precisión 0,5 o mejor de acuerdo con la Norma IEC 60051-1. Sin embargo, la clase de precisión para las medidas de resistencia debe ser 0,1. Puesto que la precisión de los aparatos suele expresarse generalmente como un porcentaje del fondo de escala, el alcance de la medida del aparato elegido debe ser tan bajo como sea posible.

3.6.2 Medición de la temperatura

La precisión de los aparatos de medida utilizados para la medición de la temperatura debe ser ± 1 °C

3.6.3 Carga

Para someter a esfuerzo al motor se ha empleado una caja de resistencias conectada como monofásica. Habiendo medido previamente el valor de sus resistencias. Pudiendo ser regulada desde vacío hasta un 100% de la carga en valores de variación de un 5%.



Ilustración 23 Caja de resistencia monofásica

3.6.4 Valores de la carga

Valor (%)	Resistencia (Ω)
0	Ø
5	486
10	244
15	162
20	122
25	98
30	82
35	70
40	63,6
45	54,8
50	49,2
55	45,2
60	41,6
65	38,2
70	35,6
75	33,2
80	31,2
85	29,4
90	27,8
95	26,4
100	25

Tabla 7 Valores de la carga

3.7 Procedimientos de ensayo

3.7.1 Montaje y alineación del motor con la dinamo freno

Es importante que los ejes del rotor del motor y el de la dinamo freno queden perfectamente alineados con el fin de evitar pérdidas adicionales que afecten al rendimiento e incrementen la temperatura del motor. También debe anclarse con seguridad el motor para evitar que las vibraciones de funcionamiento del mismo hagan perder la alineación o incluso dañar los equipos.

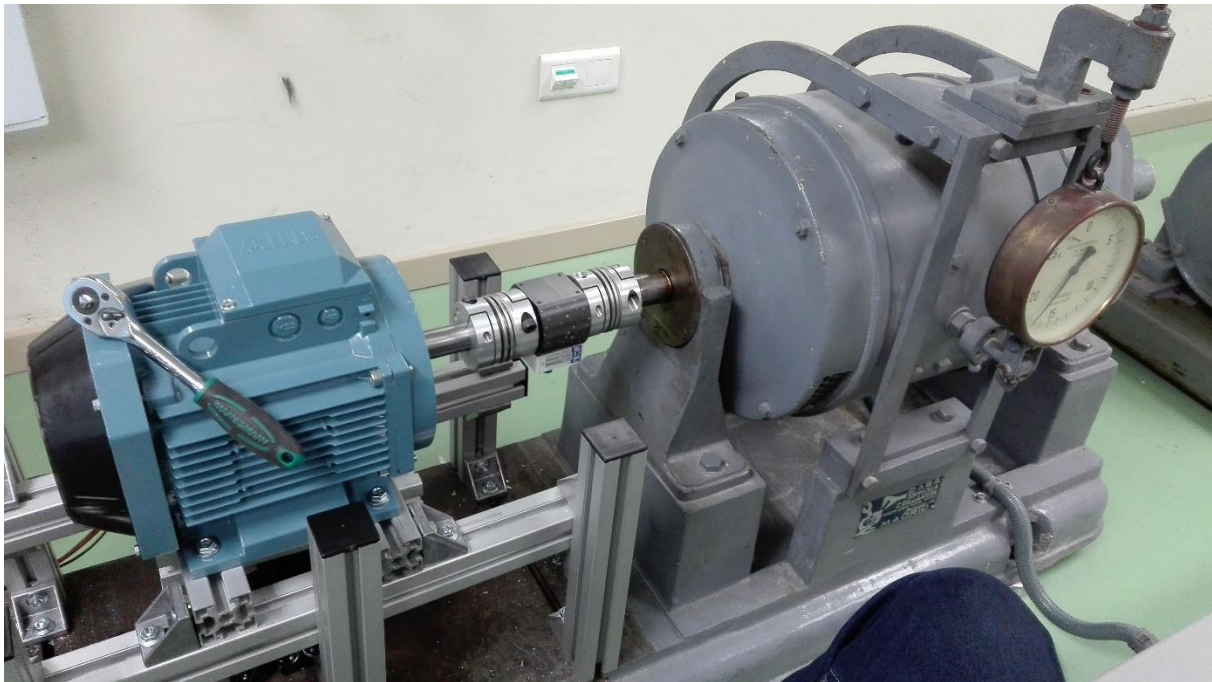


Ilustración 24 Alineación y anclaje del motor de 1'5KW con la dinamo freno

El hacer un ajuste y alineación correctos marca el resultado del ensayo e invalida los resultados si falla.

3.7.2 Conexión de los equipos de medida

Puesto que el motor no tiene accesos para colocar el equipo de medida debe abrirse la tapa de conexiones para conectar directamente a los cables de configuración (estrella/triángulo) del motor. El objetivo es tener los datos de tensión e intensidad que son absorbidos por el motor.

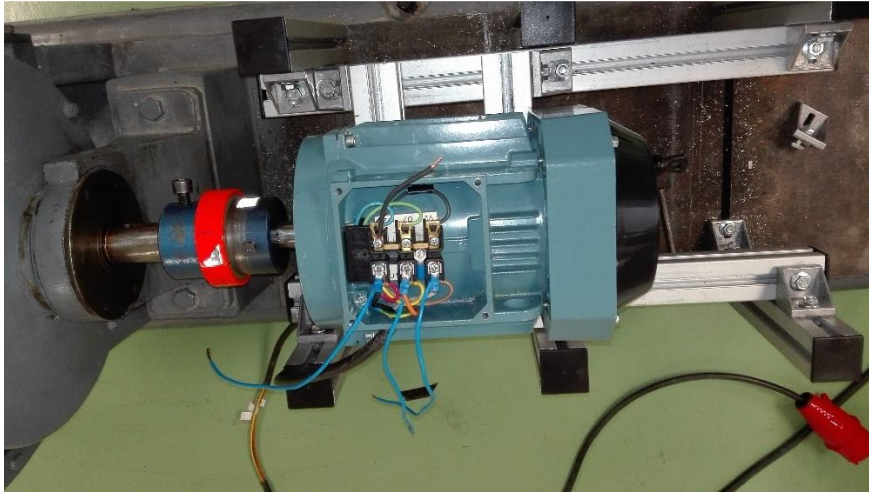


Ilustración 25 Tapa de conexiones con cables de conexión

Para facilitar la conexión y mejorarla seguridad. Mediante el uso de cables se extrae la conexión desde las patillas de la configuración asegurándolo con los mismos tornillos de apriete que se usan para el montaje de la configuración.

En el extremo de los cables añadidos se conectarán los terminales del equipo de medida asegurados con cinta aislante. Con el fin de asegurar una medida correcta y garantizar la seguridad en el trabajo.



Ilustración 26 Detalle de las pinzas correctamente conectadas

Para las medidas de potencia absorbida se emplearon las pinzas de potencias del analizador de redes fluke 434b. Respetando la secuencia de conexión R/S/T conectando cada una de las fases por separado a cada pinza correspondiente. Para

facilitar el proceso la manguera de conexión del motor tenía una sección cortada dejando accesibles las tres fases de forma independiente. Manteniendo la seguridad al respetarse los aislantes independientes de cada fase.

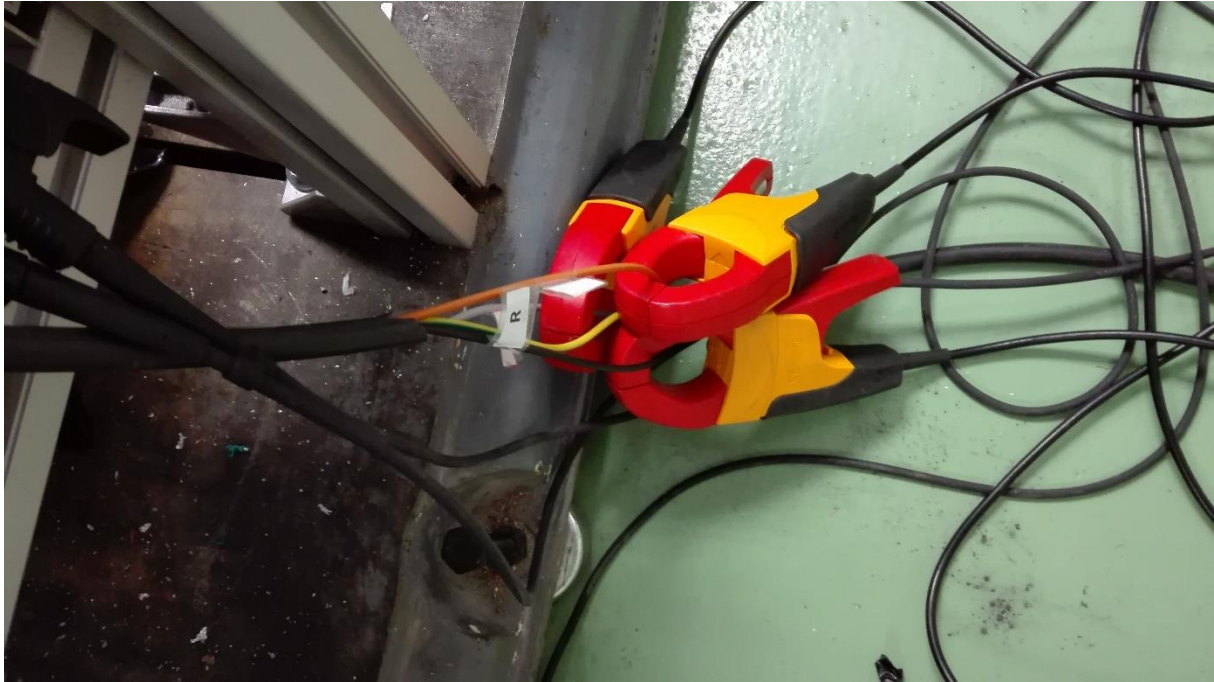


Ilustración 27 Detalle de las pinzas de potencia conectadas

Por último, la caja de resistencias es conectada con la dinamo-freno para ejercer de carga en el ensayo. Como se muestra en la imagen 3.16. El voltímetro y amperímetro están conectados al principio de la conexión de la carga monofásica.

Es importante mencionar que el termómetro laser es fijado para tomar siempre la temperatura en el mismo punto del motor. Evitando así errores por variación de la zona del motor. Puesto que la estructura del motor favorece la emisión de calor por determinadas zonas por encima de otras.



Ilustración 28 Detalle de la fijación del termómetro digital

3.7.3 Ensayo de carga progresiva

En este ensayo se parte tomando las temperaturas iniciales de motor y ambiente. Se toman las medidas oportunas con la climatización para mantener constante la temperatura de la sala de trabajo. Tras esto se procede al arranque del motor en vacío, tomando de nuevo medidas de tensión y potencia. Se deja transcurrir el tiempo dejando que la temperatura se quede estable. Una vez alcanzado una temperatura estable se aumenta la carga, seleccionando un 5% de la carga. De nuevo se repite el proceso de estabilización y toma de datos, para posteriormente aumentar de nuevo la carga. Los valores son tomados antes y después de cada variación de carga. Así como en tiempos intermedios para controlar la temperatura y las potencias ya que no dan variaciones constantes. Se lleva la carga hasta el máximo posible. Los valores tomados en el proceso son:

- Temperatura del motor y ambiente. Controlando que la temperatura ambiente sea la misma.
- Tensión del motor y de la carga.
- Intensidad absorbida por el motor y por la carga.
- Potencia absorbida por el motor.
- Factor de potencia del motor.

El tiempo medio de este tipo de ensayo es de dos horas y media, sin contar el tiempo de anclaje y alineación del motor.

3.7.4 Ensayo de carga constante

De nuevo se toman los valores de temperatura iniciales de motor y de sala. De forma previamente estudiada se selecciona una potencia próxima a la de plena carga. Incluso levemente por encima de la potencia nominal en algunos ensayos, debido a que constructivamente el motor de inducción debe ser capaz de soportar el 125% del valor a potencia nominal. El arranque se hace en vacío e inmediatamente después se pasa a la carga elegida para el ensayo. Una vez seleccionada la carga se toman valores de tensión, potencia y temperatura. A partir de este punto se reitera la toma de valores con un ciclo de tiempo periódico. Es de suma importancia el control de la temperatura de la sala de trabajo para no variar las condiciones de funcionamiento. Los valores tomados en el proceso son:

- Temperatura del motor y ambiente. Teniendo en cuenta que la temperatura ambiente ha de ser la misma mediante el uso del climatizador.
- Tensión del motor y de la carga.
- Intensidad del motor y de la carga.
- Potencia absorbida del motor.
- Factor de potencia del motor.

El tiempo medio de este ensayo es de tres horas, sin contar el tiempo de anclaje y alineación. Se da finalizado por finalizado el ensayo una vez constatado que la temperatura del motor se vuelve constante y no se detectan variaciones de tensión considerables.

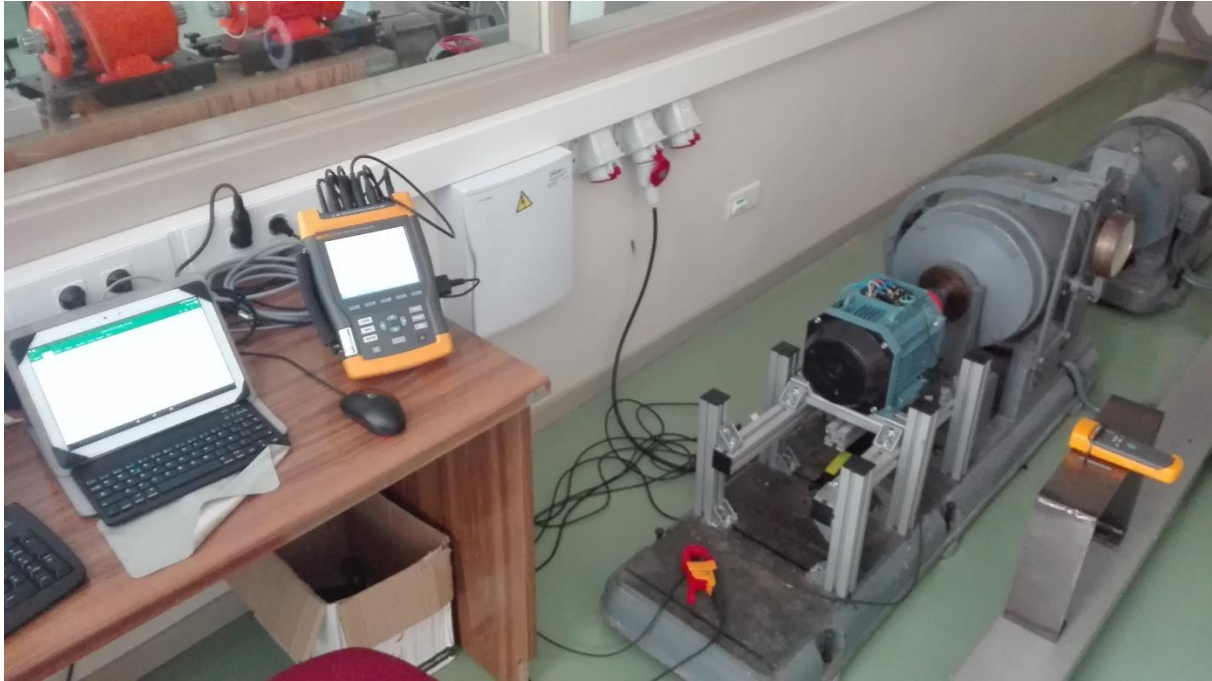


Ilustración 29 Montaje del analizador de redes en el motor

3.8 Problemas y vicisitudes en la realización de los ensayos

Como en cualquier entorno de trabajo se han encontrado impedimentos y carecías en el laboratorio para realizar los ensayos. El primero es el de la climatización ya que no se puede gestionar independientemente del resto del edificio correctamente. Bajo el pliego de condiciones de construcción se estipulaba que el control de la temperatura fuese completamente independiente. En la práctica esto es imposible. No se puede caldear la sala si el resto del edificio se está enfriando. Lo que dificulta los ensayos a alta temperatura.

El segundo de los problemas la falta de un conjunto de herramientas completo. El carecer de un juego de carracas y un nivel hizo que el ajuste y alineación fueran más lento de lo debido.

La falta de materiales de desgaste para el acople como son los tornillos de la fijación para las abrazaderas. Puesto que los existentes primariamente no soportaban el par del motor de 3kW.

Dificultad para tomar las medidas correctamente. En un primer momento se conectaron las pinzas directamente al motor sin sacar cables desde las conexiones para hacer de enlace. Esto provocó que determinados ensayos arrojasen medidas incorrectas haciendo que estos ensayos fueran descartados como datos válidos.



Ilustración 30 Imagen del primer tipo de conexión de los aparatos de medida

CAPITULO CUATRO

Resultados

4.1 tabla de características de los motores

Motor de 1,5 kW

Potencia:1,5 kW
Tensiones: 400/230 V (estrella/triángulo)
Intensidades: 3,3/5,7 A (estrella/triángulo)
Frecuencia: 50Hz
Con Θ_N : 0,76

Tabla 8 Datos del motor de 1'5 kW

Motor de 2,2 kW

Potencia:2,2 kW
Tensiones: 400/230 V (estrella/triángulo)
Intensidades: 4,6/7,9 A (estrella/triángulo)
Frecuencia: 50Hz
Con Θ_N : 0,76

Tabla 9 Datos del motor de 2'2 kW

Motor de 3 kW

Potencia:1,5 kW
Tensiones: 400/230 V (estrella/triángulo)
Intensidades: 3,3/5,7 A (estrella/triángulo)
Frecuencia: 50Hz
Con Θ_N : 0,76

*Tabla 10 Datos del motor de 3 kW***4.2 Ensayo con aumento de carga progresiva****4.2.1 Motor de 1,5 kW**

Ensayo a 20 grados

Carga(%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car} (w)	P _{abs} (W)	t (°C)	η
Ø (vacío)	152,7	0,94	143,538	1,173	22,8	0,122368
5	150,5	0,97	145,985	1,253	33,6	0,116508
10	148,4	1,23	182,532	1,32	35,7	0,138282
15	145,8	1,49	217,242	1,4	38,3	0,155173
20	144,7	2,01	290,847	1,48	40,5	0,196518
25	143,3	2,56	366,848	1,547	41,7	0,237135
30	142,5	3,13	446,025	1,627	43,5	0,27414
35	141,2	3,6	508,32	1,707	43,8	0,297786
40	140,1	4,36	610,836	1787	44,5	0,341822

Tabla 11 Datos ensayo con aumento de carga, motor 1,5 KW, a 20 °C

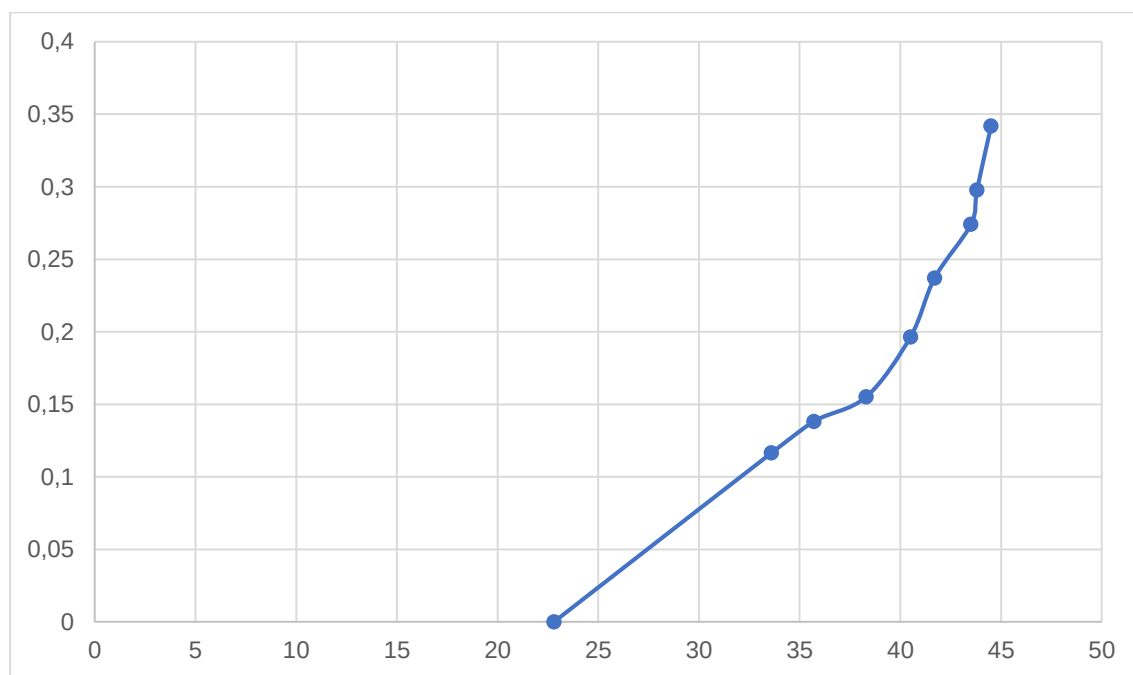


Ilustración 31 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 20 °C

Ensayo a 23 °C

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car}	P _{abs}	t (°C)	η
-----------	----------------------	----------------------	------------------	------------------	--------	--------

Ø (vacio)	149,7	0	0	1,173	35,1	0
5	148,5	0,84	124,74	1,253	36,6	0,099553
10	147,3	0,72	106,056	1,32	37,7	0,080345
15	145,8	1,49	217,242	1,4	38,8	0,155173
20	144,3	2,01	290,043	1,48	40,4	0,195975
25	143,3	2,56	366,848	1,547	41,7	0,237135
30	142,3	3,13	445,399	1,627	42,2	0,273755
35	141,2	3,6	508,32	1,707	43,8	0,297786
40	140,2	4,36	611,272	1,787	44,8	0,342066

Tabla 12 Datos ensayo con aumento de carga, motor 1,5 kW, a 23 °C

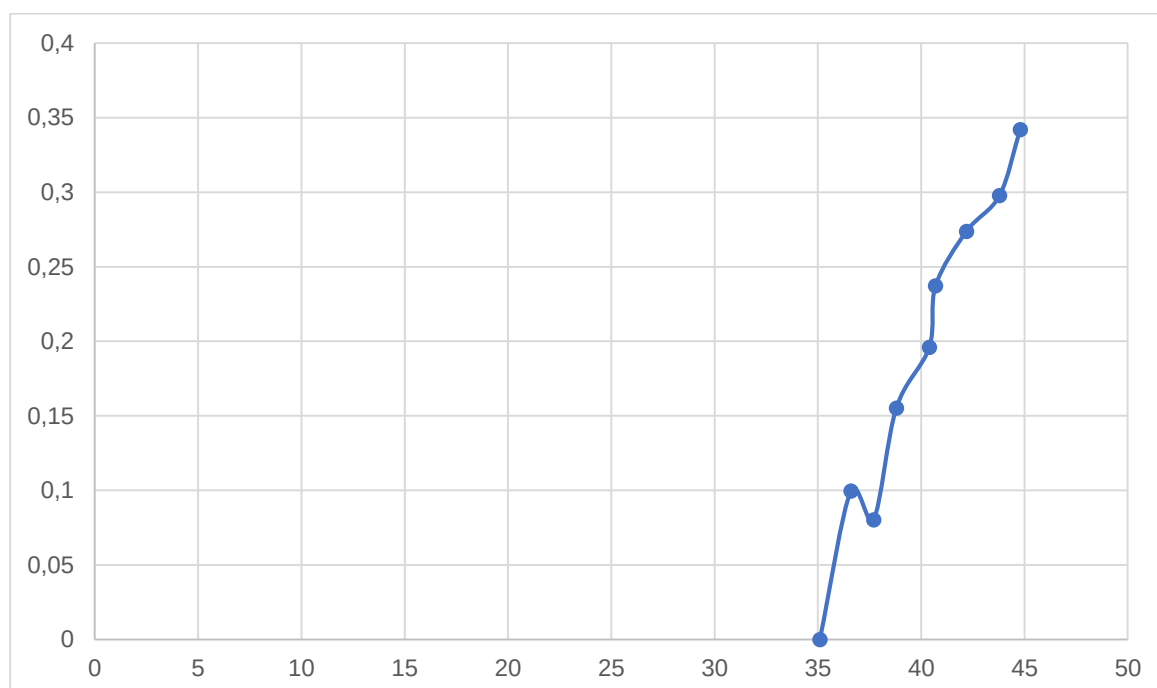


Ilustración 32 Gráfica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 23 °C

Ensayo a 25 °C

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car}	P _{abs}	t (°C)	η
Ø (vacio)	160,5	0	0	0,7	25,5	0
5	155,8	0,59	91,922	0,6	30,4	0,153203
5	154,5	0,64	98,88	0,6	30,4	0,1648
10	151	0,64	96,64	0,6	34,7	0,161067
10	150	1,25	187,5	0,6	34,7	0,3125
15	148,6	1,25	185,75	0,6	36,4	0,309583
15	147,7	1,85	273,245	0,7	36,4	0,39035
25	147	1,85	271,95	0,7	37,5	0,3885

25	146,3	2,45	358,435	0,7	37,5	0,51205
30	145,8	2,45	357,21	0,7	38,5	0,5103
30	144,9	3,03	439,047	0,7	38,5	0,62721
40	144,5	3,03	437,835	0,7	40,1	0,625479

Tabla 13 Datos ensayo con aumento de carga, motor 1,5 kW, a 25 °C

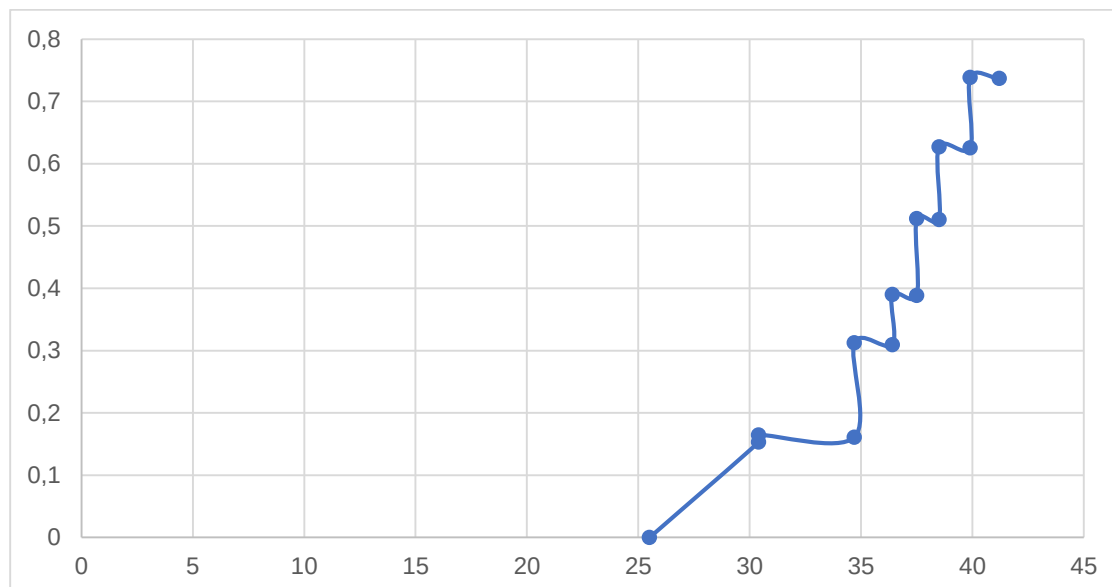


Ilustración 33 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 25 °C

Grafica con los datos conjuntos

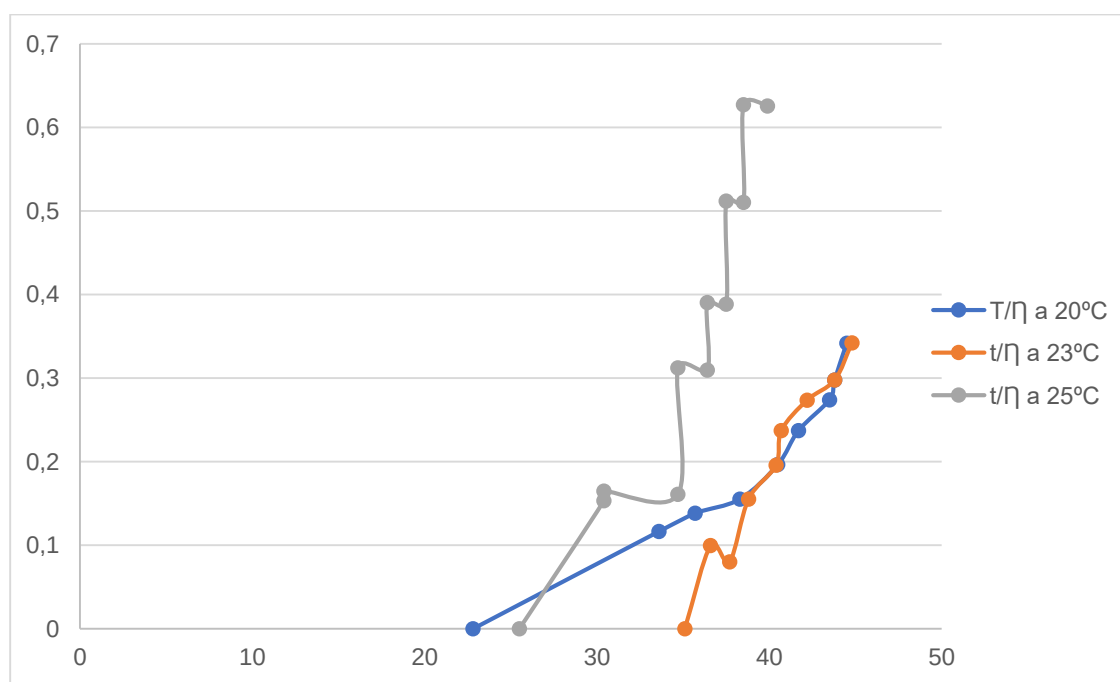


Ilustración 34 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas

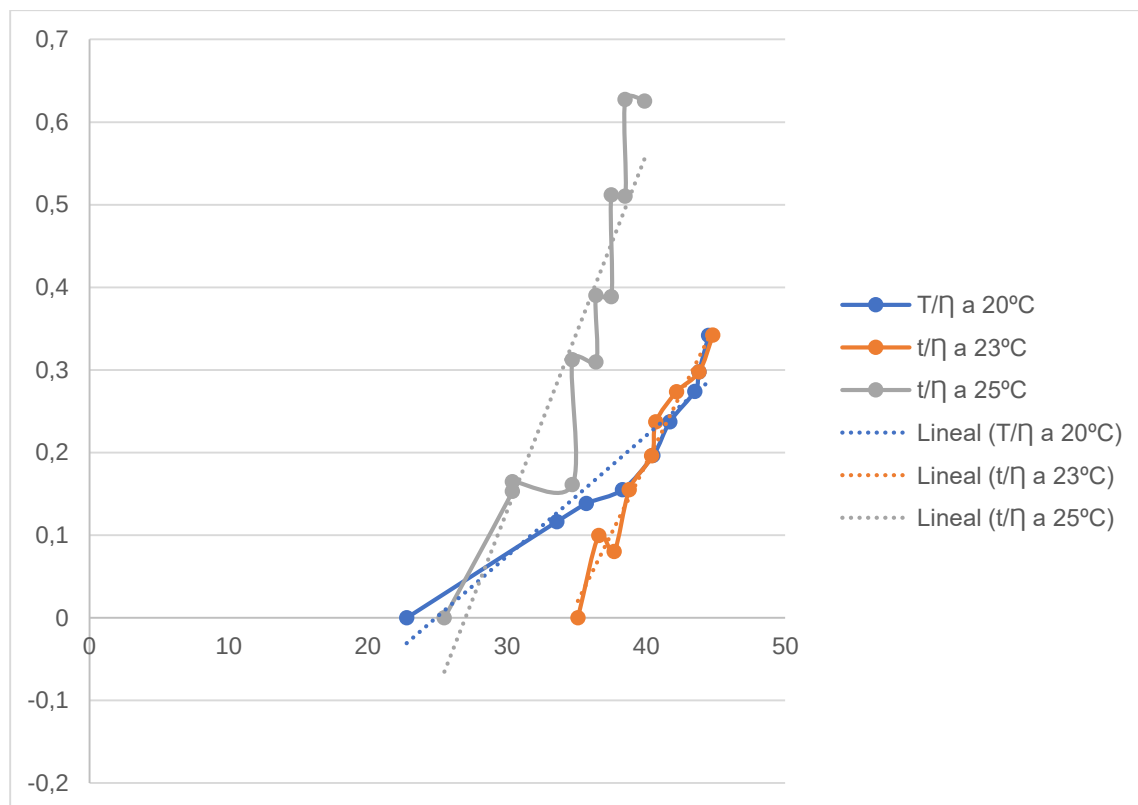


Ilustración 35 Temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.

4.2.2 Motor de 2,2 kW

Ensayo a 20°C

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car}	P _{abs}	t (°C)	η
Ø (vacío)	158,3	0	0	1	21	0
5	156	3,06	477,36	1,894835	29,7	0,251927
10	154,2	3,7	570,54	1,932501	30,8	0,295234
15	153,3	4,4	674,52	1,984034	31,8	0,339974
20	152	4,93	749,36	1,975389	32,7	0,379348
25	151,1	5,47	826,517	2,047381	33	0,403695
30	150	6,08	912	2,051302	33,9	0,444596
35	149,2	6,74	1005,608	2,141684	34,6	0,469541
40	148,3	7,2	1067,76	2,141684	35,2	0,498561
45	147,6	7,9	1166,04	2,257359	35,9	0,51655
50	146,8	8,55	1255,14	2,308279	36,5	0,543756
55	146,1	9,04	1320,744	2,326886	37	0,567601
60	145,6	9,7	1412,32	2,381783	38,1	0,592968
65	144,7	10,26	1484,622	2,428843	48,9	0,611247
70	144	10,81	1556,64	2,484063	40,1	0,626651

75	143,2	11,45	1639,64	2,546433	40,9	0,643897
80	142,7	12,01	1713,827	2,593313	41,8	0,660864

Tabla 14 Datos ensayo con aumento de carga, motor 2,2 kW, a 20 °C

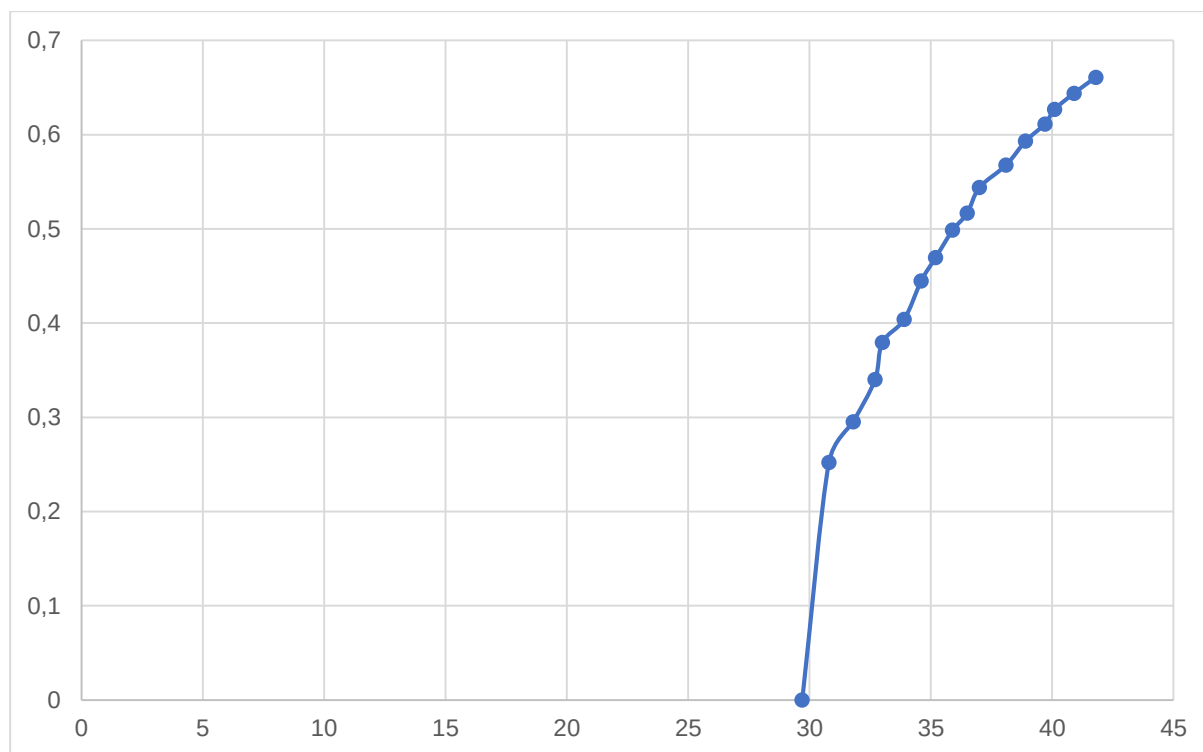


Ilustración 36 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 20 °C

Ensayo a 23 °C

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car}	P _{abs}	t (°C)	η
Ø (vacio)	158,3	0	0	1	22	0
5	155,3	2,83214393	439,831952	1,072	30	0,410291
10	153,6	3,24003509	497,66939	1,153	31,6	0,43163
15	151,2	3,90945774	591,11001	1,251	33	0,47251
20	150	4,60415787	690,62368	1,312	34,1	0,52639
25	149,2	5,08970697	759,38428	1,381	35,5	0,54988
30	148,3	5,56489508	825,27394	1,457	37,3	0,56642
35	147,9	6,08528925	900,01428	1,551	38,6	0,58028
40	147,3	6,41013381	944,21271	1,623	39,4	0,58177
45	147	7,04965537	1036,29934	1,733	40,8	0,59798
50	146,6	7,63824502	1119,76672	1,808	42	0,61934

Tabla 15 Datos ensayo con aumento de carga, motor 2,2 kW, a 23 °C

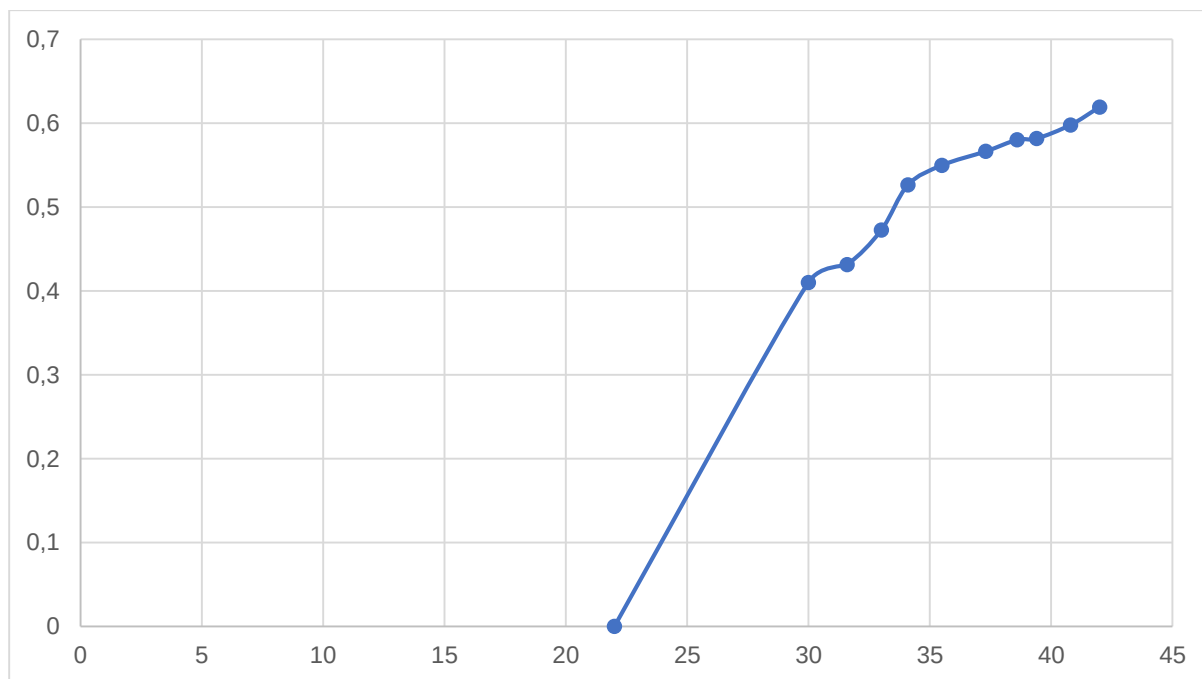


Ilustración 37 Gráfica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 23 °C

Ensayo a 25 °C

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car}	P _{abs}	t (°C)	η
Ø (vacío)	158,3	0	0	1	24,5	0
5	156	3,06	477,36	1,067	30,8	0,447385
10	154,2	3,7	570,54	1,147	31,8	0,497419
15	153,3	4,4	674,52	1,253	32,7	0,538324
20	152	4,93	749,36	1,307	33	0,573344
25	151,1	5,47	826,517	1,373	33,9	0,601979
30	150	6,08	912	1,453	34,6	0,627667
35	149,2	6,74	1005,608	1,547	35,2	0,650037
40	148,3	7,2	1067,76	1,64	35,9	0,651073
45	147,6	7,9	1166,04	1,72	36,5	0,67793
50	146,8	8,55	1255,14	1,8	37	0,6973
55	146,1	9,04	1320,744	1,893	38,1	0,697699
60	145,6	9,7	1412,32	1,973	38,9	0,715824
65	144,7	10,26	1484,622	2,053	39,7	0,723148
70	144	10,81	1556,64	2,133	40,1	0,729789
75	143,2	11,45	1639,64	2,213	40,9	0,740913
80	142,7	12,01	1713,827	2,307	41,8	0,742881
85	142,1	12,6	1790,46	2,387	42,3	0,750088

Tabla 16 Datos ensayo con aumento de carga, motor 2,2 kW, a 25 °C

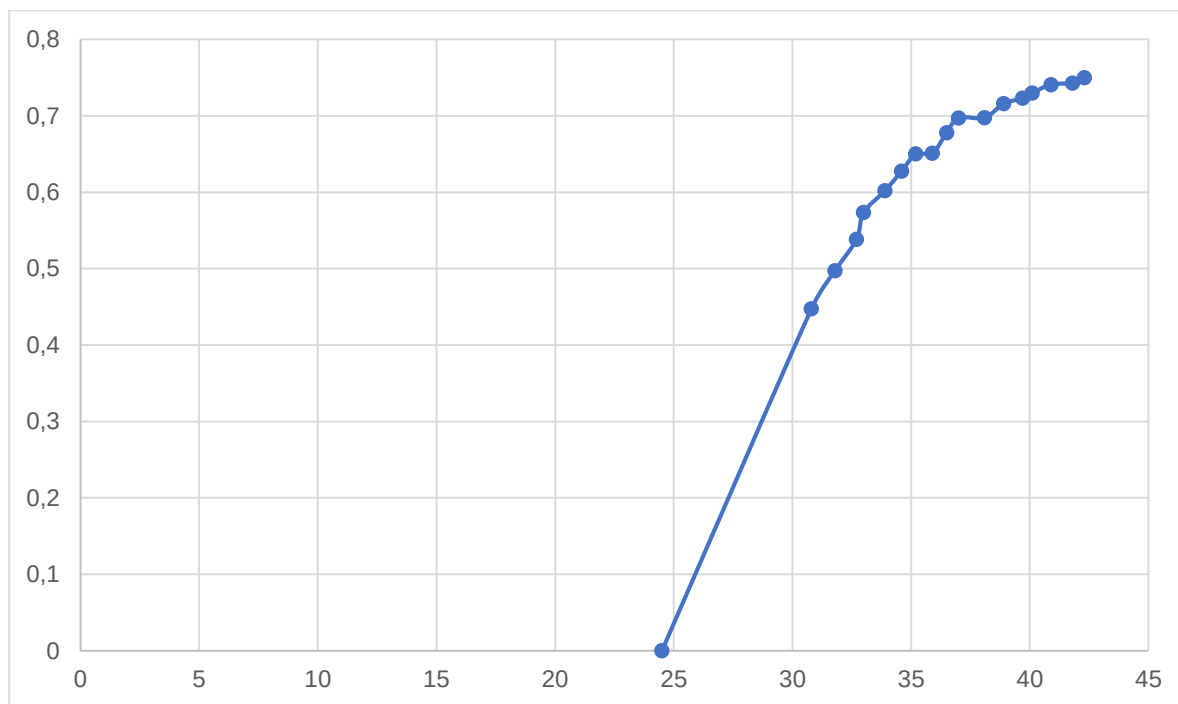


Ilustración 38 Gráfica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 25 °C

Gráfica con los datos conjuntos

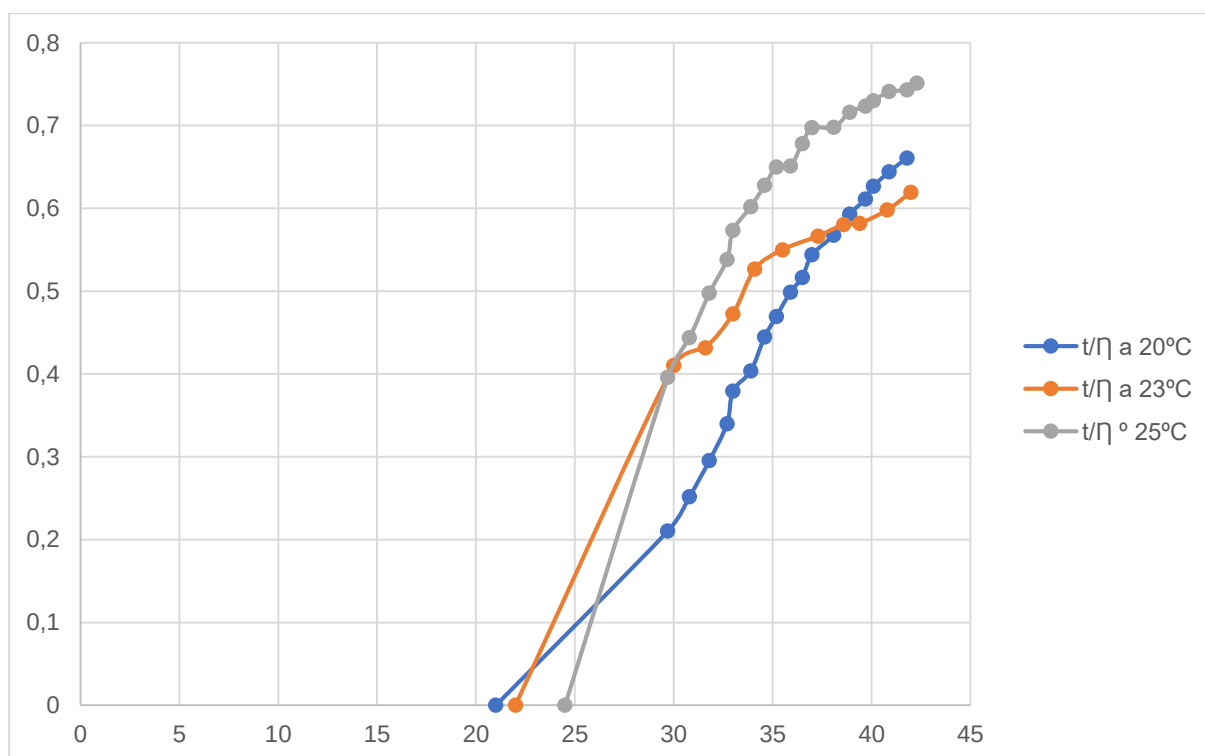


Ilustración 39 Gráfica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, de las distintas temperaturas

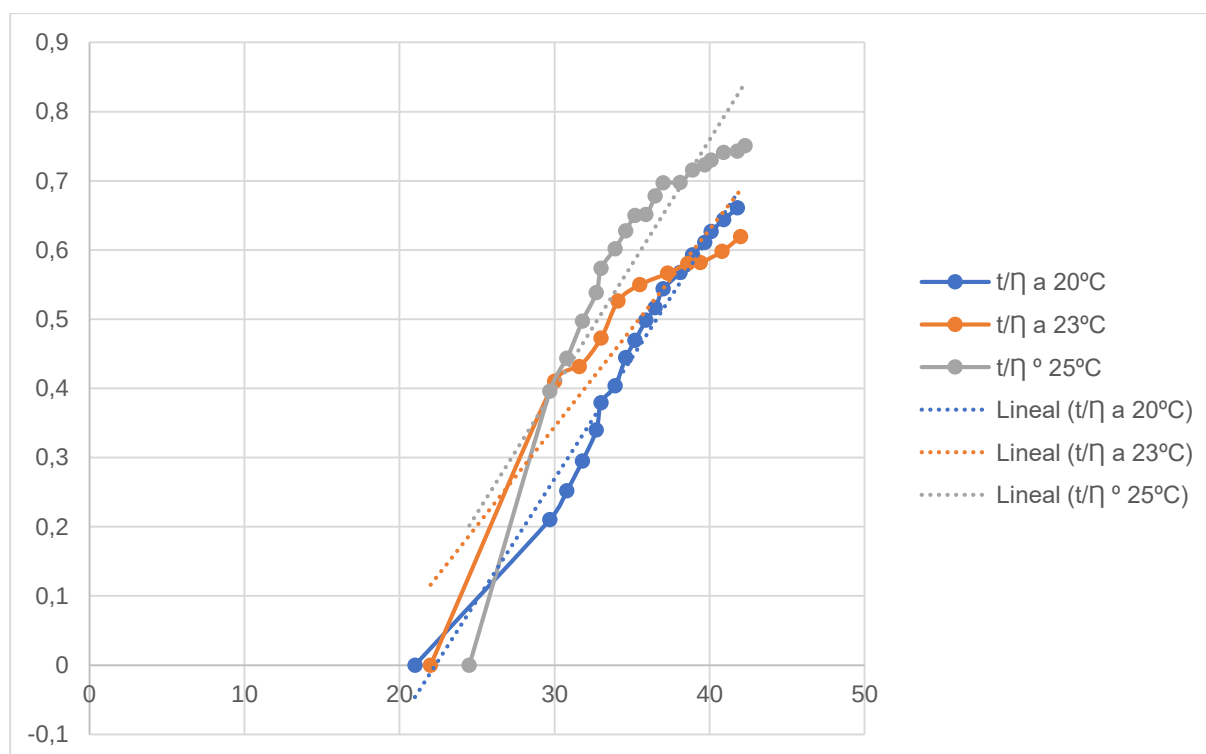


Ilustración 40 Temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.

4.2.3 Motor de 3 kW

Ensayo a 20 °C

Carga (%)	V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
Ø (vacío)	163,1	0	0	0,8	19,6	0
10	157,8	1,246873	196,75656	0,88	30,9	0,223587
10	157,4	1,33002999	209,34672	0,88	32	0,237894
20	156,8	2,32724955	364,91273	0,91	33,1	0,401003
20	156,1	2,52728744	394,50957	0,91	34,6	0,433527
20	155,4	2,57894595	400,7682	0,9	35	0,445298
30	154,7	3,7473033	579,70782	1,02	35,4	0,568341
30	153,5	3,97996811	610,925105	1,013	36	0,603085
40	152,9	4,94400497	755,93836	1,13	36,8	0,668972
40	152,6	5,43476834	829,345648	1,124	37,4	0,737852
50	150,3	6,15602419	925,250436	1,206	37,9	0,767206
50	149,6	6,19977584	927,486465	1,185	38,5	0,782689
60	148,7	7,11780228	1058,4172	1,323	38,9	0,800013
60	146,9	7,09427631	1042,14919	1,318	39,4	0,790705
70	145,5	8,60945368	1252,67551	1,502	40,1	0,834005
70	145	9,04157441	1311,02829	1,495	40,6	0,876942
80	143,8	10,1740099	1463,02262	1,624	41,2	0,900876
80	142,9	10,508565	1501,67394	1,617	42	0,928679

90	141,7	11,275946	1597,80155	1,708	43	0,935481
90	141,5	11,3386649	1604,42109	1,696	43,8	0,946003
100	141,2	11,9178054	1682,79412	1,756	44,1	0,958311
100	140,8	11,9817515	1687,03061	1,755	44,2	0,961271

Tabla 17 Datos ensayo con aumento de carga, motor 3 kW, a 20 °C

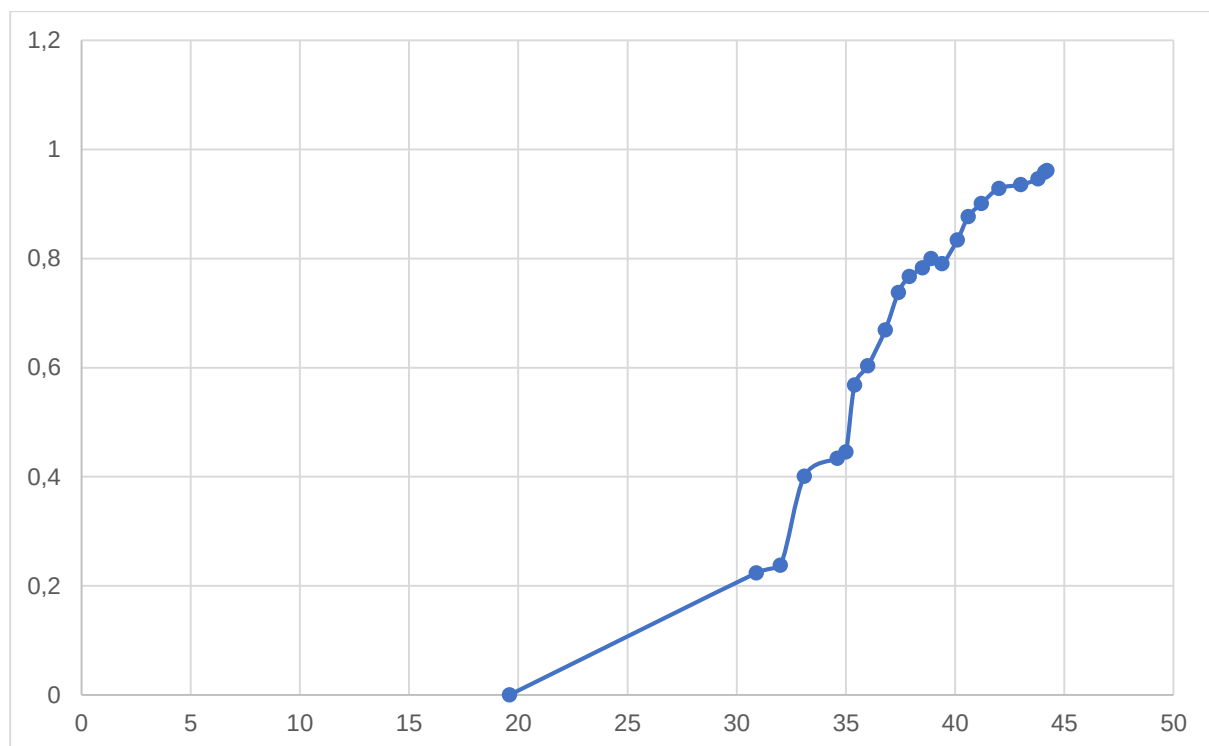


Ilustración 41 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 20 °C

Ensayo a 23 °C

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car} (W)	P _{abs} (W)	t (°C)	η
Ø (vacío)	154,1	0	0	0,96	21,7	0
5	151,3	2,08	314,704	1	35,2	0,314704
10	150,8	1,48	223,184	1,08	35,2	0,206651852
15	149,9	0,85	127,415	1,173	35	0,108623188
20	149,1	0,26	38,766	1,253	35,4	0,030938547
25	148,4	0,59	87,556	1,267	35,4	0,069104972
30	147,6	1,09	160,884	1,44	35,9	0,111725
35	147,2	1,7	250,24	1,52	36,3	0,164631579
40	146,4	2,23	326,472	1,56	36,6	0,209276923
45	145,9	2,86	417,274	1,68	36,9	0,248377381
50	145,1	3,3	478,83	2,73	37,6	0,175395604
55	144,6	3,86	558,156	1,867	38,1	0,298958757
60	144	4,34	624,96	1,933	39	0,323310916

Tabla 18 Datos ensayo con aumento de carga, motor 3 kW, a 23 °C

Ilustración 42 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 23 °C

30	148,8	3,5	520,8	0,945	37,2	0,551111
40	147,8	4,94	730,132	1,104	37,2	0,661351
40	147,2	4,93	725,696	1,104	38,4	0,657333
50	146,2	6,02	880,124	1,168	38,4	0,753531
50	145,5	6,03	877,365	1,152	39,8	0,761602
60	144,6	7,17	1036,782	1,292	39,8	0,802463
60	144,1	7,18	1034,638	1,292	40,6	0,800803
70	143,2	8,32	1191,424	1,44	40,6	0,827378
70	142,9	8,34	1191,786	1,404	41,4	0,84885
80	141,8	9,46	1341,428	1,539	41,4	0,871623
80	141,4	9,46	1337,644	1,539	43,1	0,869164
90	140,4	10,57	1484,028	1,596	43,1	0,929842
90	140,2	10,58	1483,316	1,577	44,2	0,940594
100	139,2	11,66	1623,072	1,7	44,2	0,954748
100	139,3	11,64	1621,452	1,7	45,2	0,953795

Tabla 19 Datos ensayo con aumento de carga, motor 3 kW, a 25 °C

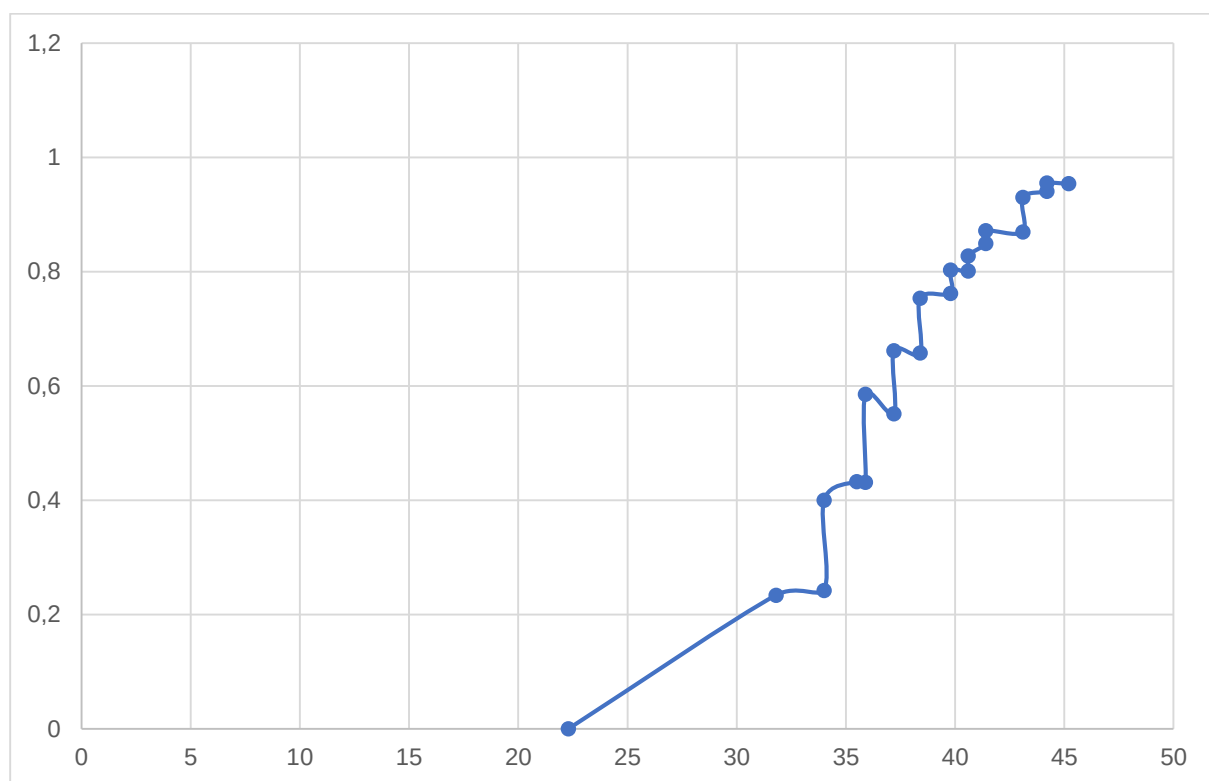


Ilustración 43 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 25 °C

Graficas con los datos conjuntos

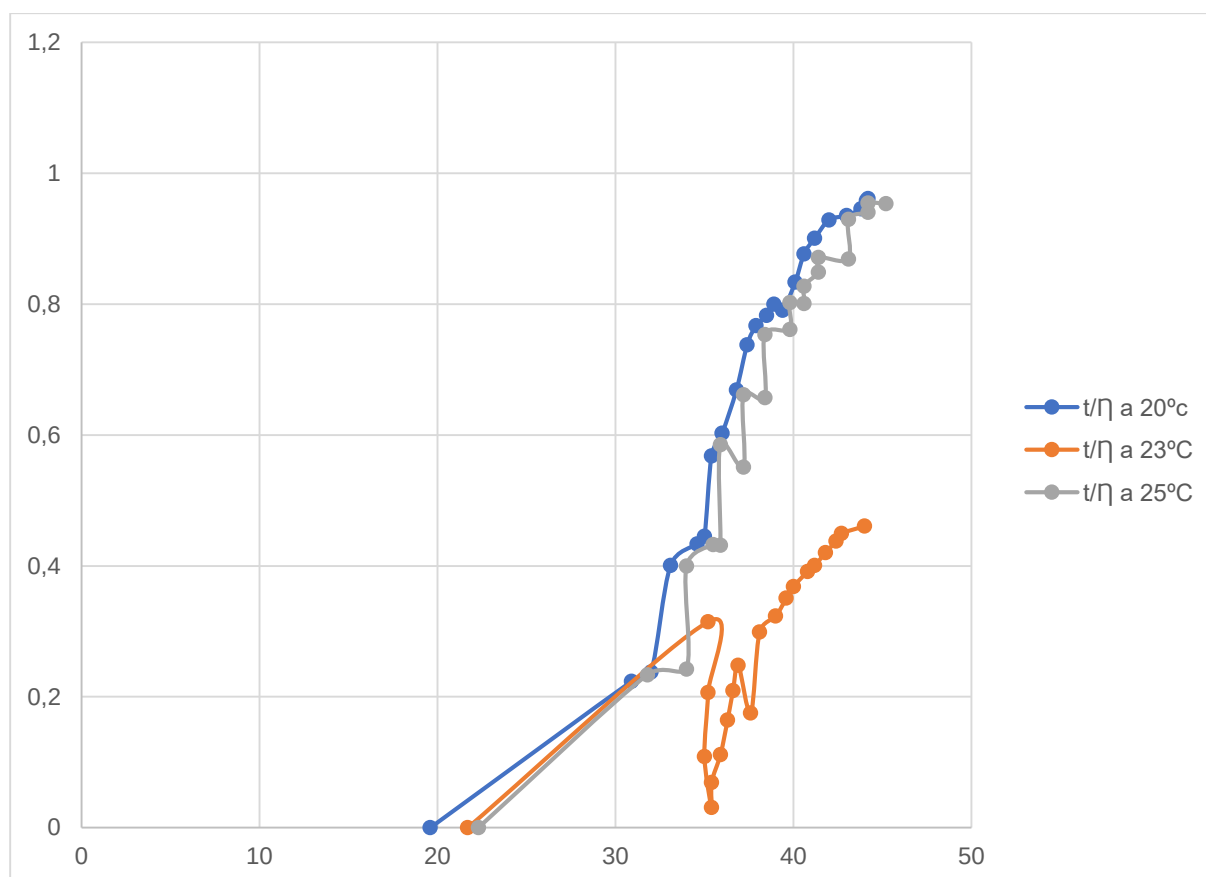


Ilustración 44 Gráfica temperatura rendimiento del motor 3 kW, de las distintas temperaturas

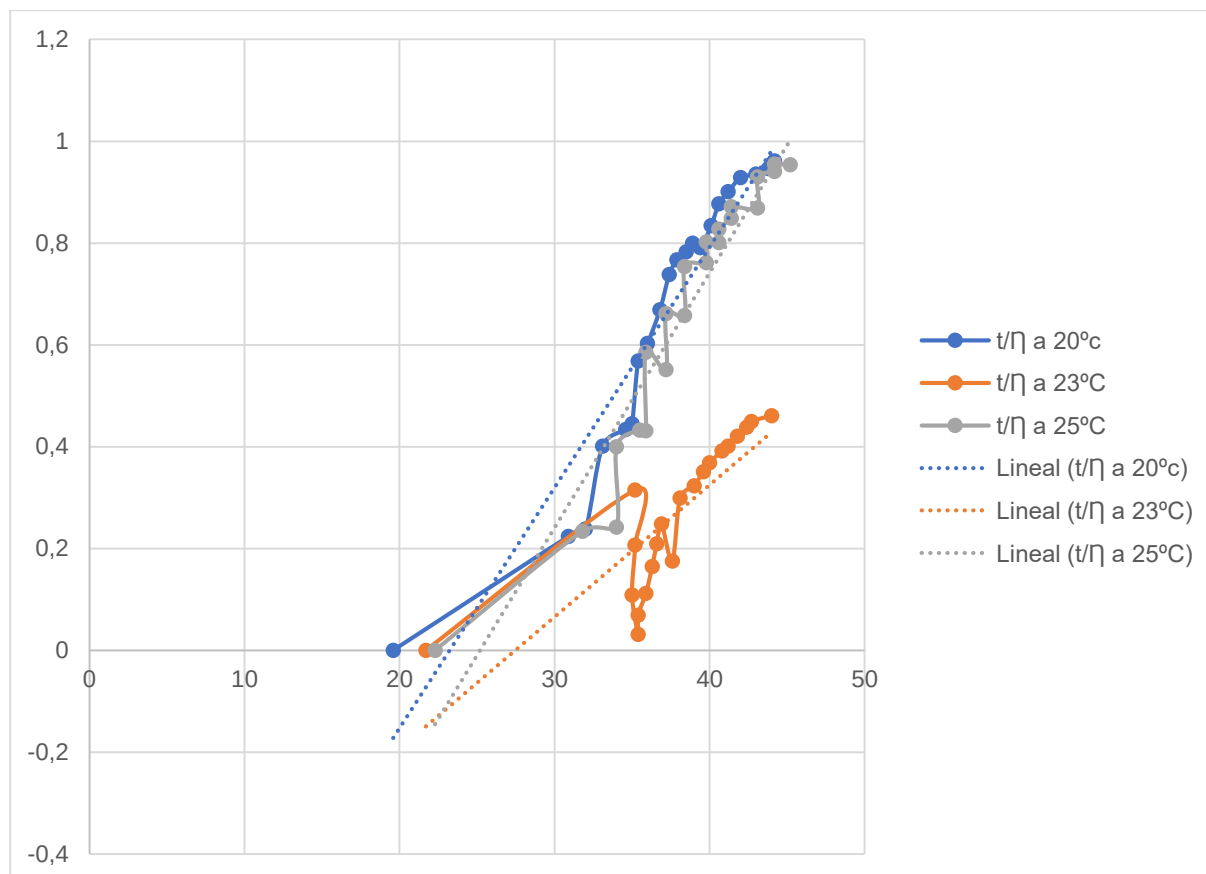


Ilustración 45 Temperatura rendimiento del motor 3 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.

4.3 Ensayo a carga constante

4.3.1 Motor de 1,5 kW

Todos los ensayos están hechos con una carga del 60%.

Ensayo a 20 °C

V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
161	0	0	1,095445	21	0
146,8	9,64	1415,152	1,83303	24,9	0,772029
143,5	9,57	1373,295	1,754993	34,2	0,782507
142,1	9,46	1344,266	1,652271	36,5	0,813587
141,2	9,42	1330,104	1,652271	38,7	0,805016
140	9,35	1309	1,652271	44,1	0,792243
139,7	9,29	1297,813	165,2271	46,7	0,785472
138,5	9,25	1281,125	1,549193	46,5	0,826963
137,5	9,19	1263,625	154,9193	46,8	0,815666
136,2	9,11	1240,782	154,9193	50,8	0,800921
135,6	9,07	1229,892	154,9193	53,9	0,793892
135,1	9,02	1218,602	154,9193	55,6	0,786604

134,6	9	1211,4	154,9193	55	0,781955
133,2	8,98	1196,136	1,445683	56,8	0,889501
133,9	8,96	1199,744	1,445683	57,3	0,82988041
133,7	8,94	1195,278	1,445683	58,2	0,826791
133,5	8,93	1192,155	1,469694	57,8	0,811159
133,4	8,91	1188,594	1,469694	57	0,808736
133,4	8,9	1187,26	1,469694	56,8	0,807828
133	8,9	1183,7	1,469694	56,6	0,805517
133	8,9	1183,7	1,469694	56,6	0,805406

Tabla 20 Datos ensayo con carga constante, motor 1,5 kW, a 20 °C

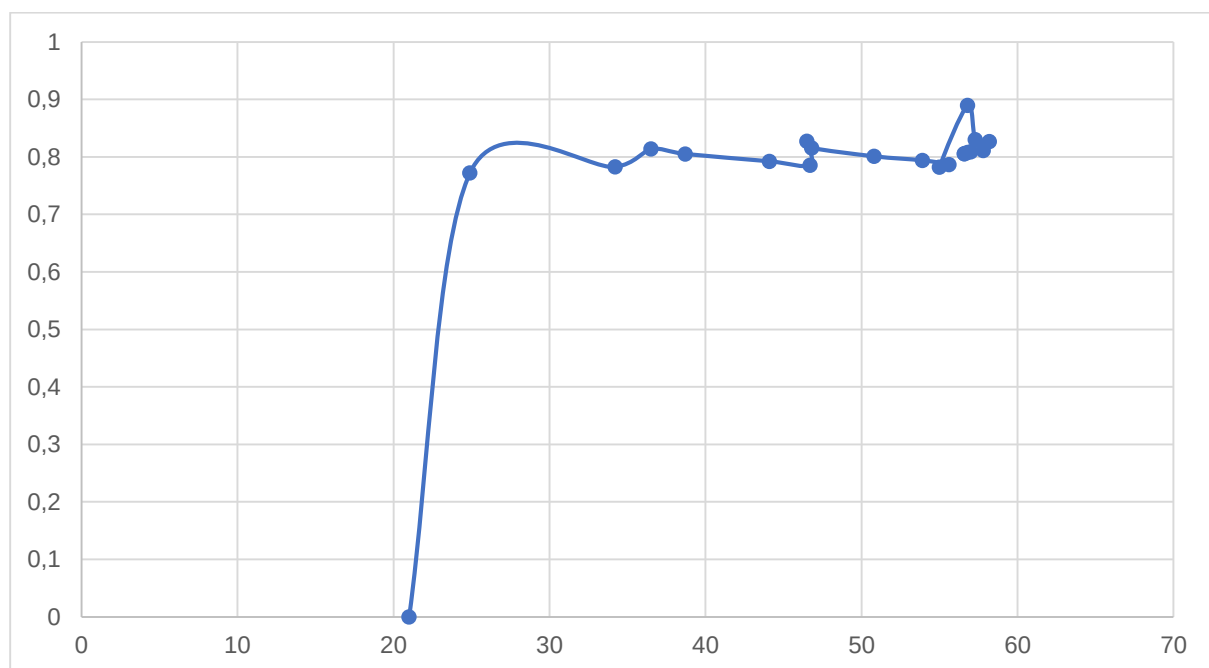


Ilustración 46 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 20 °C

Ensayo a 25 °C

V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car} (W)	P _{abs} (KW)	t (°C)	η
163	0	0	0,748	24	0
147,1	9,62034143	1415,15222	1,824	25,1	0,775851
143,2	9,59005006	1373,29517	1,728	34	0,794731
142,1	9,46000172	1344,26625	1,615	36,3	0,832363
141,4	9,40667829	1330,10431	1,615	39,1	0,823594
140,3	9,33000349	1308,99949	1,615	44,4	0,810526
139,5	9,30331459	1297,81239	1,615	46,6	0,803599
138,7	9,23665753	1281,1244	1,52	46,4	0,842845
137,7	9,17664999	1263,6247	1,504	48,1	0,840176
136,4	9,09664188	1240,78195	1,504	54,3	0,824988
135,9	9,47546137	1287,7152	1,488	55,1	0,8654
135,5	8,99337317	1218,60206	1,488	57,9	0,818953

135,3	9,00666714	1218,60206	1,488	55,9	0,818953
134,9	8,32821305	1123,47594	1,38	56,6	0,814113
134,1	9,07484295	1216,93644	1,38	57,3	0,881838
133,8	8,96669955	1199,7444	1,38	57,5	0,86938
133,2	8,95010811	1192,1544	1,38	57,5	0,86388
133,4	8,91000169	1188,59423	1,365	57,3	0,870765
133,1	8,92006476	1187,26062	1,365	57	0,869788
133	8,899995	1183,69934	1,365	56,8	0,867179
133,2	8,88663164	1183,69934	1,365	56,5	0,867179

Tabla 21 Datos ensayo con carga constante, motor 1,5 kW, a 25 °C

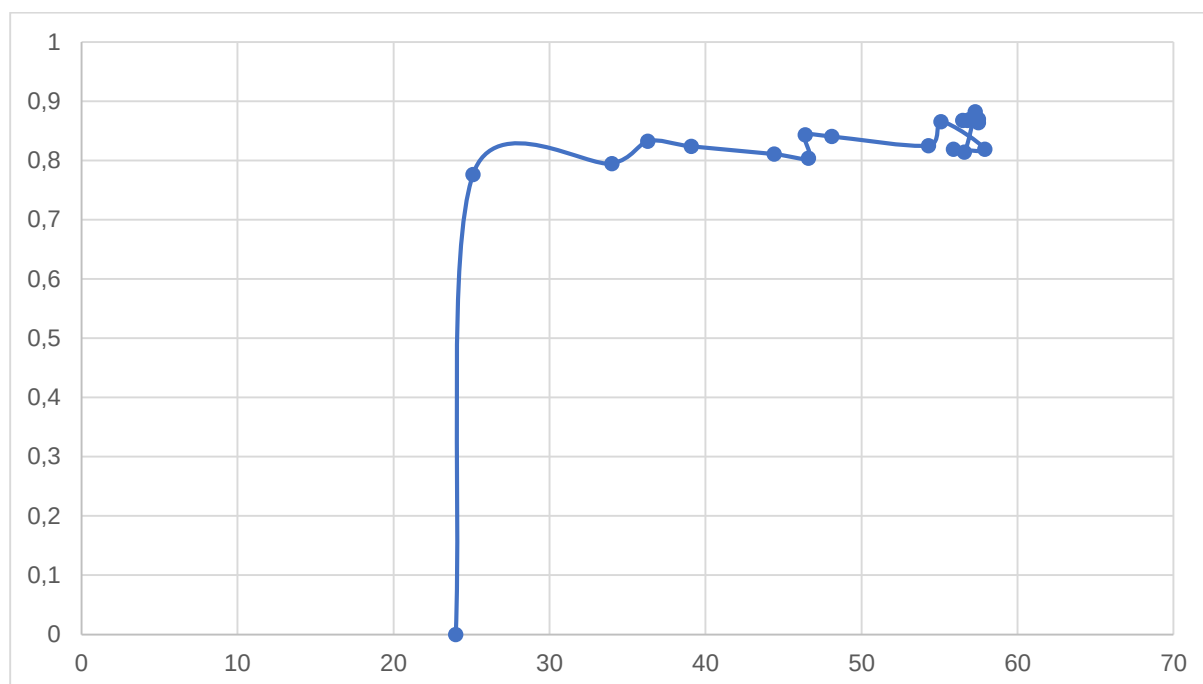


Ilustración 47 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, a 25 °C

Ensayo a 40 °C

V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
159,4	0	0	0,7	36	0
137,7	8,11	1116,747	0	54,7	0,855866
134,4	7,99	1073,856	1,456	52,9	0,737538
133,8	7,93	1061,034	1,335	53,8	0,794782
132,8	7,89	1047,792	1,335	57,9	0,784863
132,8	7,89	1047,792	1,32	59,8	0,793782

Tabla 22 Datos ensayo con carga constante, motor 1,5 kW, a 40 °C

Graficas con los datos conjuntos

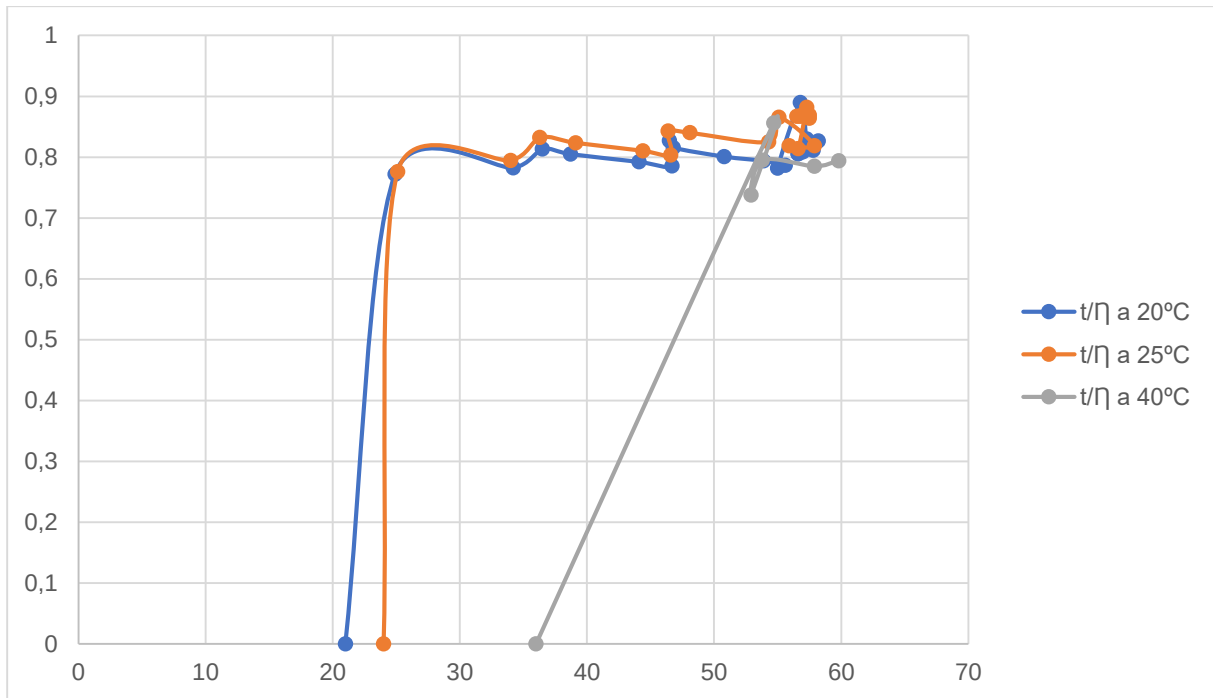


Ilustración 48 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas

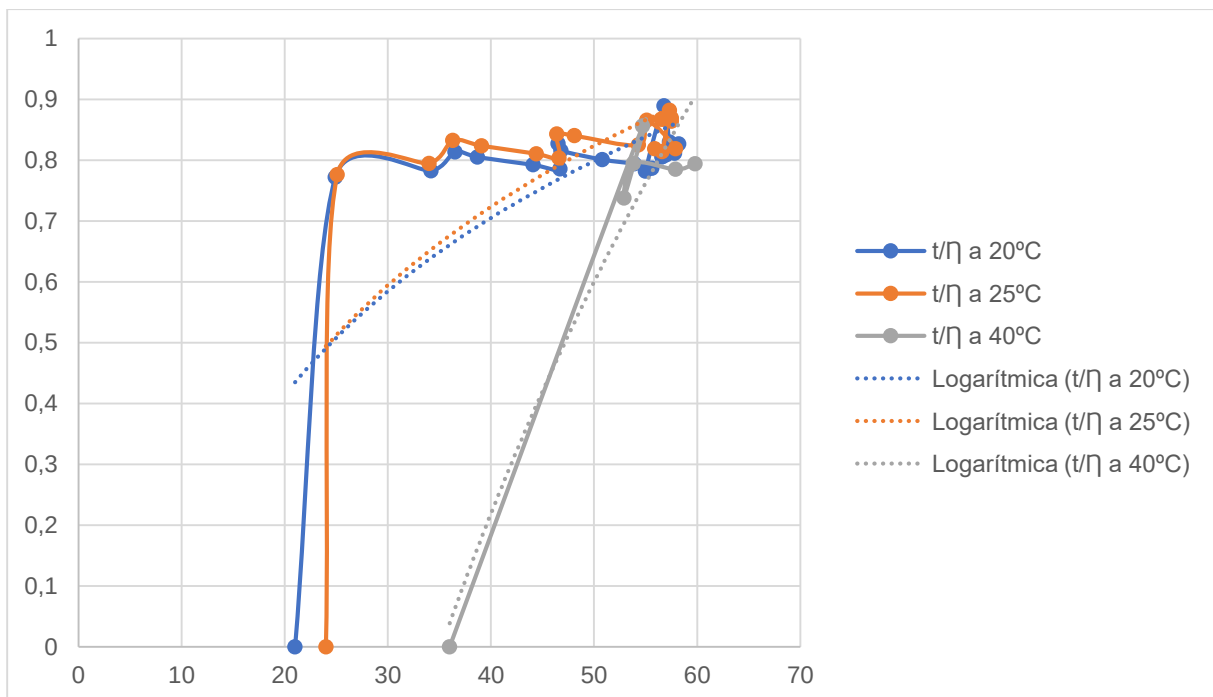


Ilustración 49 Temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.

4.3.2 Motor 2,2 kW

Todos los ensayos están hechos con una carga del 80%.

Ensayo a 20 °C

V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
158,3	0	0	1	20	0
156,8	11,2	1756,2	2,2	23,4	0,7983
155,75	10,6	1651	2,1	26	0,7862
155,13	10,5	1628,9	2,1	27	0,7757
154,86	9,93	1537,8	2	29	0,7689
154,33	9,81	1514	2	30,4	0,757
154,06	9,63	1483,6	1,978	31,5	0,75
153,23	9,57	1466,4	1,9	32,5	0,7718
153,17	9,56	1464,3	1,9	32,8	0,7707
153,08	9,55	1461,9	1,9	34	0,7694
152,82	9,52	1454,8	1,9	34,7	0,7657
152,64	9,49	1448,6	1,901	35	0,762
152,81	9,46	1445,6	1,9	35,8	0,7608
152,33	9,41	1433,4	1,889	36,1	0,7588
152,48	9,38	1430,3	1,864	36,5	0,7673
152,4	9,33	1421,9	1,843	37	0,7715
151,97	9,3	1413,3	1,833	37,2	0,771
151,55	9,27	1404,9	1,825	37,4	0,7698
151,02	9,25	1396,9	1,82	37,9	0,7675
150,66	9,23	1390,6	1,819	38,1	0,7645
150,21	9,22	1384,9	1,818	38,2	0,7618
149,91	9,2	1379,2	1,816	38,5	0,7595
149,57	9,19	1374,5	1,815	38,5	0,7573
149,36	9,17	1369,6	1,813	38,8	0,7555

Tabla 23 Datos ensayo con carga constante, motor 2,2 kW, a 20 °C

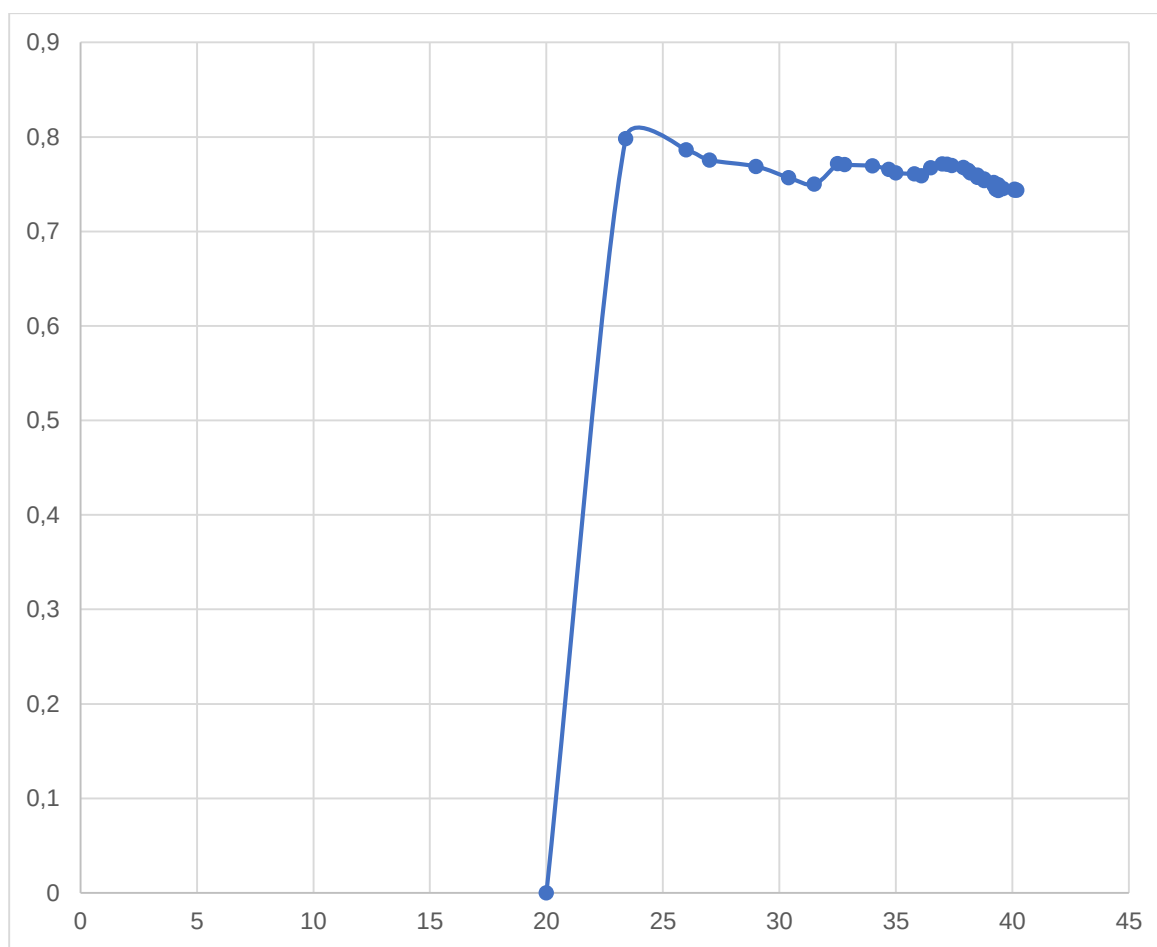


Ilustración 50 Gráfica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 20 °C

Ensayo a 25 °C

V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
162	0	0	1	23,2	0
147,83	12,48	1844,9	2,3	41,3	0,8021
147,67	12,34	1822,2	2,3	41,8	0,7923
147,61	12,31	1817,1	2,3	42,7	0,79
147,54	12,26	1808,8	2,3	42,9	0,7865
147,51	12,23	1804	2,3	43,5	0,7844
147,42	12,22	1801,5	2,3	43,5	0,7832
147,39	12,17	1793,7	2,3	43,9	0,7799
147,23	12,03	1771,2	2,3	43,5	0,7701
147	11,87	1744,9	2,3	43,5	0,7586
146,75	11,65	1709,6	2,263	44	0,7555
146,34	11,5	1682,9	2,2	44,3	0,7649
146,11	11,48	1677,3	2,2	44,8	0,7624
146,02	11,45	1671,9	2,2	44,8	0,76
145,99	11,42	1667,2	2,2	44,5	0,7578

145,87	11,39	1661,5	2,2	44,8	0,7552
145,66	11,37	1656,2	2,2	44,8	0,7528
145,63	11,36	1654,4	2,2	44,3	0,752
145,51	11,35	1651,5	2,2	44,5	0,7507
145,46	11,33	1648,1	2,2	44,3	0,7491
145,32	11,31	1643,6	2,2	44,9	0,7471
145,23	11,28	1638,2	2,2	44,5	0,7446
145,18	11,24	1631,8	2,2	44,3	0,7417
145,1	11,21	1626,6	2,2	44,4	0,7394
145	11,21	1625,5	2,182	44,3	0,7449
145	11,2	1624	2,18	44,1	0,745

Tabla 24 Datos ensayo con carga constante, motor 2,2 kW, a 25 °C

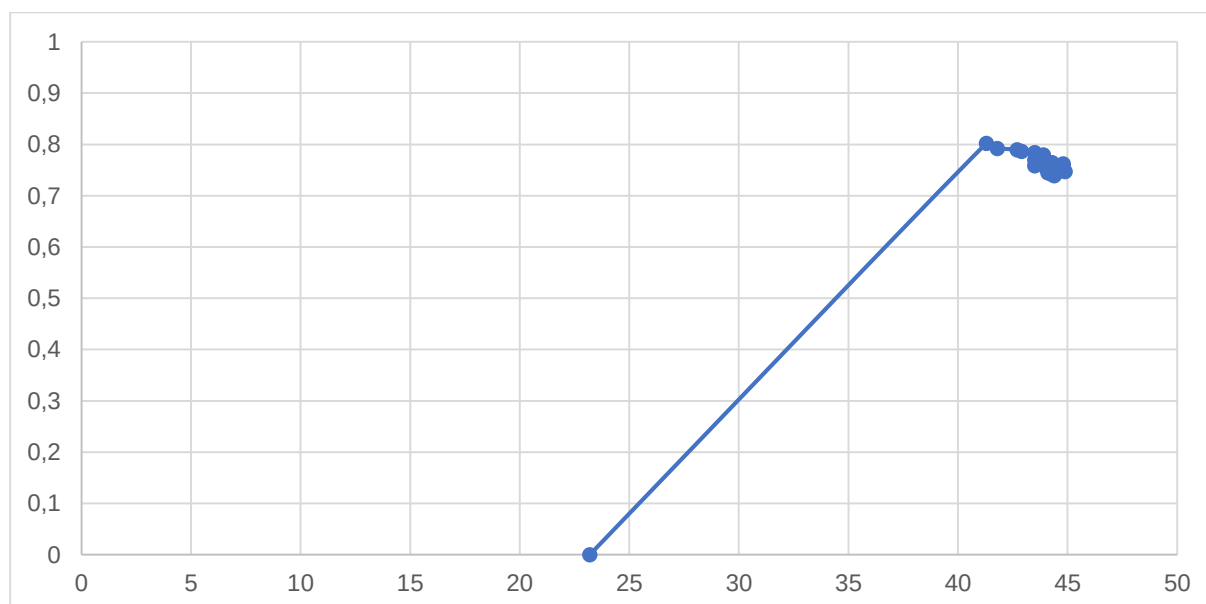


Ilustración 51 Grafica temperatura rendimiento del motor 2,2 KW, a 25 °C

Ensayo a 40 °C

V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car} (W)	P _{abs} (KW)	t (°C)	η
153	0	0		39,2	0
148,33	12,51	1855,61	2,3	39,8	0,80679
147,7	12,37	1827,05	2,3	40,4	0,79437
147,58	12,34	1821,14	2,3	40,6	0,7918
147,55	12,3	1814,87	2,3	41,3	0,78907
147,4	12,22	1801,23	2,3	41,8	0,78314
147,2	12,2	1795,84	2,3	42	0,7808
147,05	12,17	1789,6	2,2832	42,4	0,78381
146,94	12,03	1767,69	2,2743	42,7	0,77724

146,64	11,91	1746,48	2,268	42,9	0,77005
146,41	11,74	1718,85	2,253	42,9	0,76292
146,15	11,38	1663,19	2,2	43,1	0,75599
146,08	11,33	1655,09	2,2	43,5	0,75231
146,02	11,31	1651,49	2,2	43,7	0,75068
145,87	11,3	1648,33	2,2	43,8	0,74924
145,73	11,28	1643,83	2,2	43,8	0,7472
145,64	11,26	1639,91	2,2	43,8	0,74541
145,24	11,25	1633,95	2,2	43,8	0,7427
145,01	11,23	1628,46	2,2	43,9	0,74021
144,89	11,22	1625,67	2,2	44,3	0,73894
144,69	11,15	1613,29	2,2	44,5	0,73332
144,43	11,09	1601,73	2,2	44,8	0,72806
144,32	11	1587,52	2,177	45,2	0,72922
144,06	10,68	1538,56	2,1	45,8	0,73265
143,95	10,64	1531,63	2,1	46,3	0,72935
143,87	10,6	1525,02	2,1	46,5	0,7262
143,72	10,6	1523,43	2,1	46,4	0,72544
143,7	10,4	1494,48	2,1	46,5	0,71166
143,7	10,4	1494,48	2,1	46,3	0,71166

Tabla 25 Datos ensayo con carga constante, motor 2,2 kW, a 40 °C

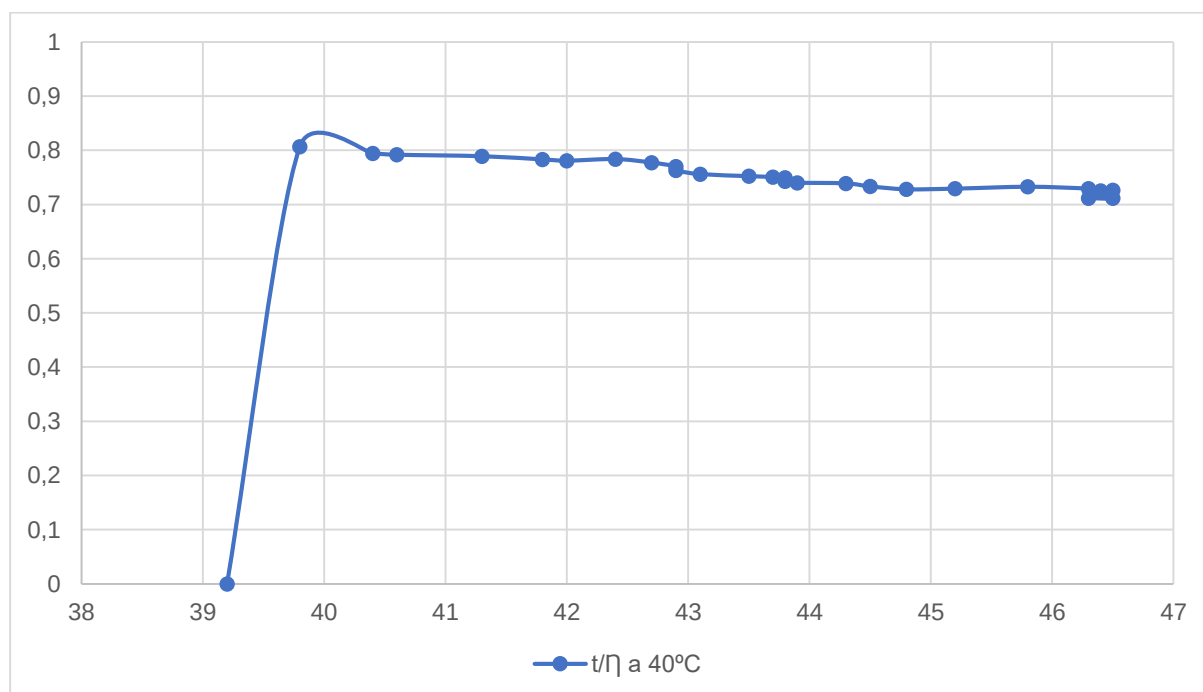


Ilustración 52 Gráfica temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, a 25 °C

graficas con los datos conjuntos

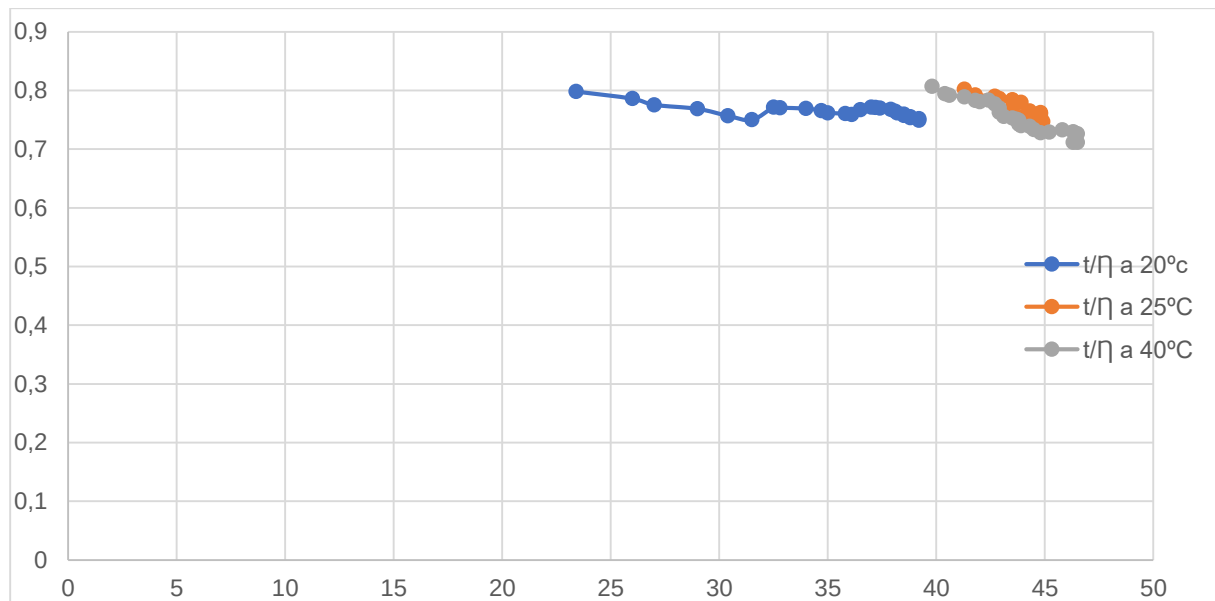


Ilustración 53 Grafica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas

Como nota aclaratoria cabe mencionar que se eliminan los puntos de inicio en vacío. Puesto que al añadir la línea de tendencia dichos puntos desvirtúan en exceso el resultado

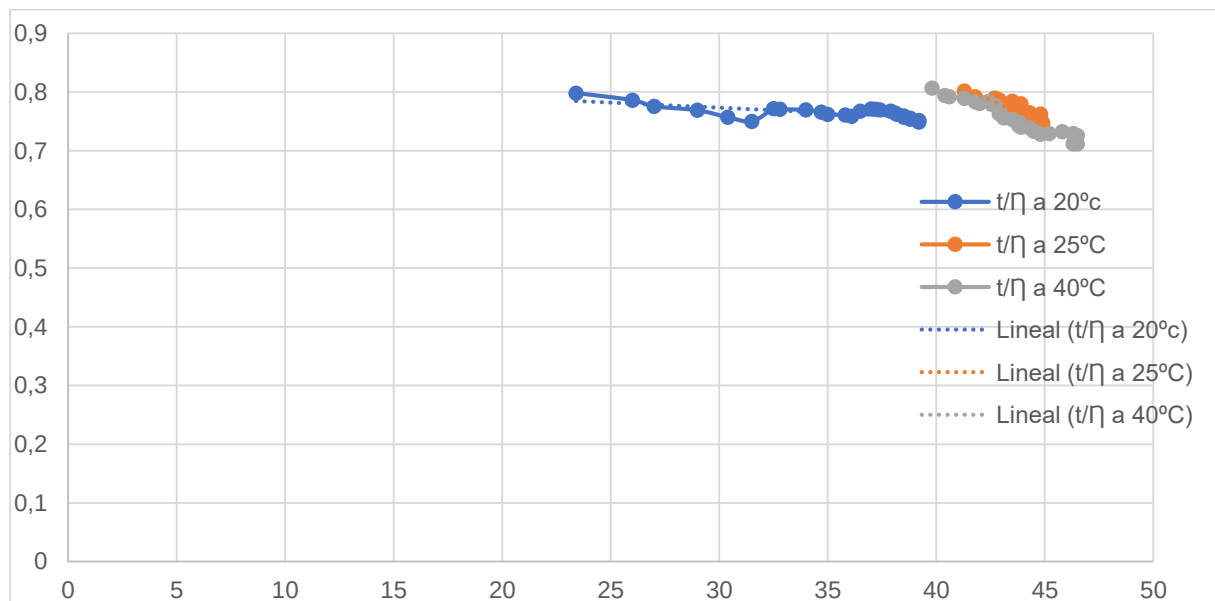


Ilustración 54 Temperatura rendimiento del motor 2,2 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo línea de tendencia.

4.3.3 Motor 3 kW

Todos los ensayos están hechos con una carga del 100%.

Ensayo a 20 °C

V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
---------------	---------------	---------------	----------------	----------	--------

165	0	0	0,81	20,1	0
153	12,517	1915,1	2,232	25,4	0,858
147,5	12,313	1816,2	2,002	34,7	0,9072
144,8	12,075	1748,5	1,89	38,8	0,9251
143,8	11,913	1713,1	1,848	43,5	0,927
142,2	11,876	1688,8	1,848	45,9	0,9139
141	11,588	1633,9	1,827	46,4	0,8943
140,7	11,825	1663,8	1,74	47,3	0,9562
140	11,785	1649,9	1,74	47,9	0,9482
139,8	11,747	1642,2	1,74	48,3	0,9438
139,7	11,7	1634,5	1,74	48,3	0,9394
139,5	11,672	1628,2	1,72	48,4	0,9466
139,4	11,662	1625,6	1,74	48,2	0,9343
139,2	11,588	1613,1	1,74	48,1	0,9271
138,9	11,595	1610,5	1,74	48,3	0,9256
138,7	11,608	1610,1	1,72	48,3	0,9361
138,5	11,535	1597,6	1,72	48,2	0,9288
138,3	11,552	1597,6	1,72	48,5	0,9288
138,1	11,532	1592,5	1,72	48,4	0,9259
138,2	11,523	1592,5	1,7	48,7	0,9368

Tabla 26 Datos ensayo con carga constante, motor 3 kW, a 20 °C

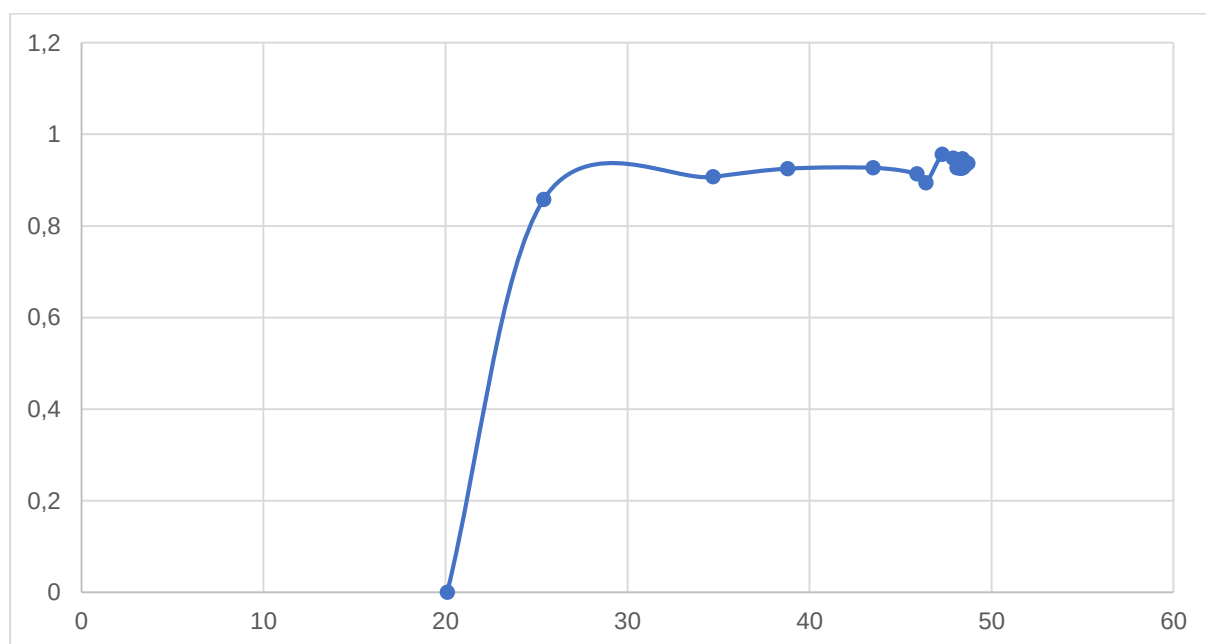


Ilustración 55 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 20 °C

Ensayo a 25 °C

V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car} (W)	P _{abs} (KW)	t (°C)	η
----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	--------	---

163,9	0	0	0,8	25,8	0
152,6	12,55	1915,1	2,34734	26	0,8159
147,3	12,33	1816,2	2,16333	35,5	0,8395
144,5	12,1	1748,5	2,06155	40,1	0,8481
143	11,98	1713,1	2,06155	44	0,831
141,8	11,91	1688,8	2,06155	45,7	0,8192
141,1	11,58	1633,9	2,06155	46,5	0,7926
141	11,8	1663,8	1,95959	47,1	0,8491
140,3	11,76	1649,9	1,95959	48	0,842
140	11,73	1642,2	1,95959	48,3	0,838
139,7	11,7	1634,5	1,95959	48,4	0,8341
139,4	11,68	1628,2	1,95959	48,5	0,8309
139,3	11,67	1625,6	1,95959	48,4	0,8296
138,7	11,63	1613,1	1,95959	48,3	0,8232
138,6	11,62	1610,5	1,95959	48,4	0,8219
138,8	11,6	1610,1	1,97737	49,5	0,8143
138,2	11,56	1597,6	1,95959	49,7	0,8153
138,2	11,56	1597,6	1,95959	50,7	0,8153
138	11,54	1592,5	1,95959	51	0,8127
138	11,54	1592,5	1,95959	51	0,8127

Tabla 27 Datos ensayo con carga constante, motor 3 kW, a 25 °C

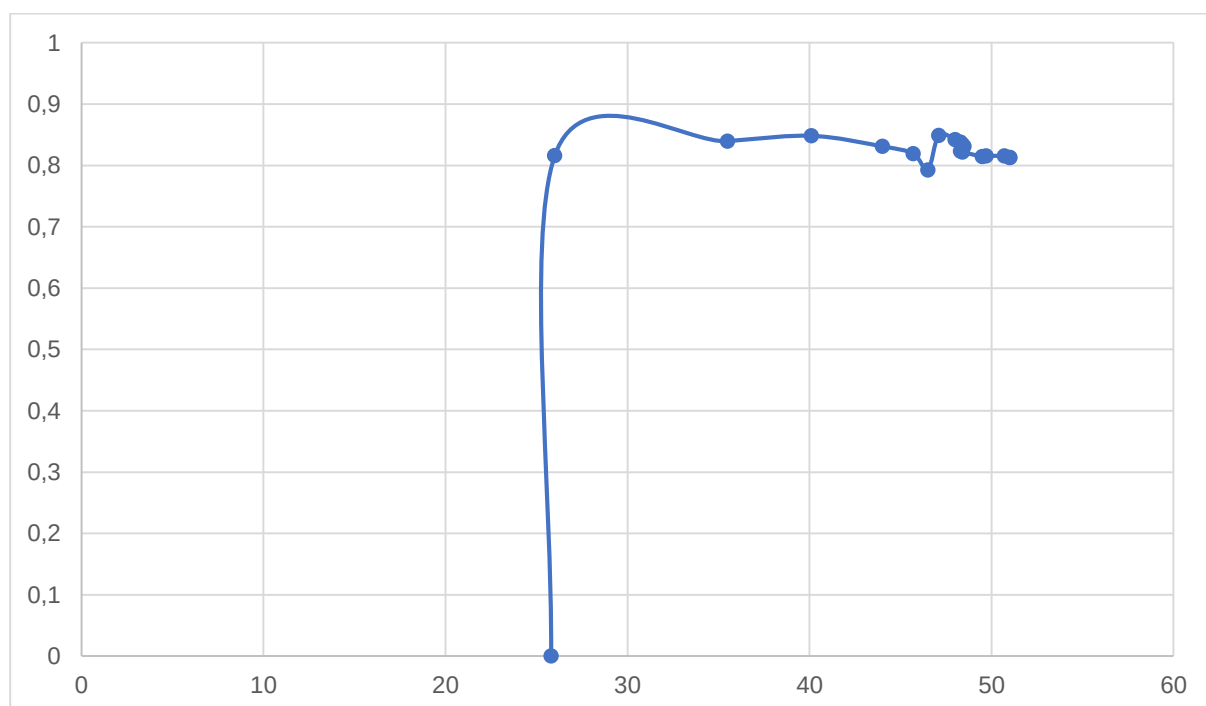


Ilustración 56 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 25 °C

Ensayo a 40 °C

V_{car} (V)	I_{car} (A)	P_{car} (W)	P_{abs} (KW)	t (°C)	η
164	0	0	1,5	34	0
152,2	12,53	1907,066	2,244994	34,7	0,8495
147,8	12,45	1840,11	2,163331	38	0,8506
144,8	12,37	1791,176	2,061553	41,4	0,8688
143,1	12	1717,2	2,061553	43,1	0,833
142,6	12,06	1719,756	2,061553	45	0,8342
140,6	11,42	1605,652	1,959592	46,2	0,8194
139,4	11,4	1589,16	1,959592	47,3	0,811
138,7	11,39	1579,793	1,959592	48,5	0,8062
137,9	11,36	1566,544	1,959592	50,7	0,7994
137,8	11,36	1565,408	1,959592	53,2	0,7988

Tabla 28 Datos ensayo con carga constante, motor 3 kW, a 25 °C

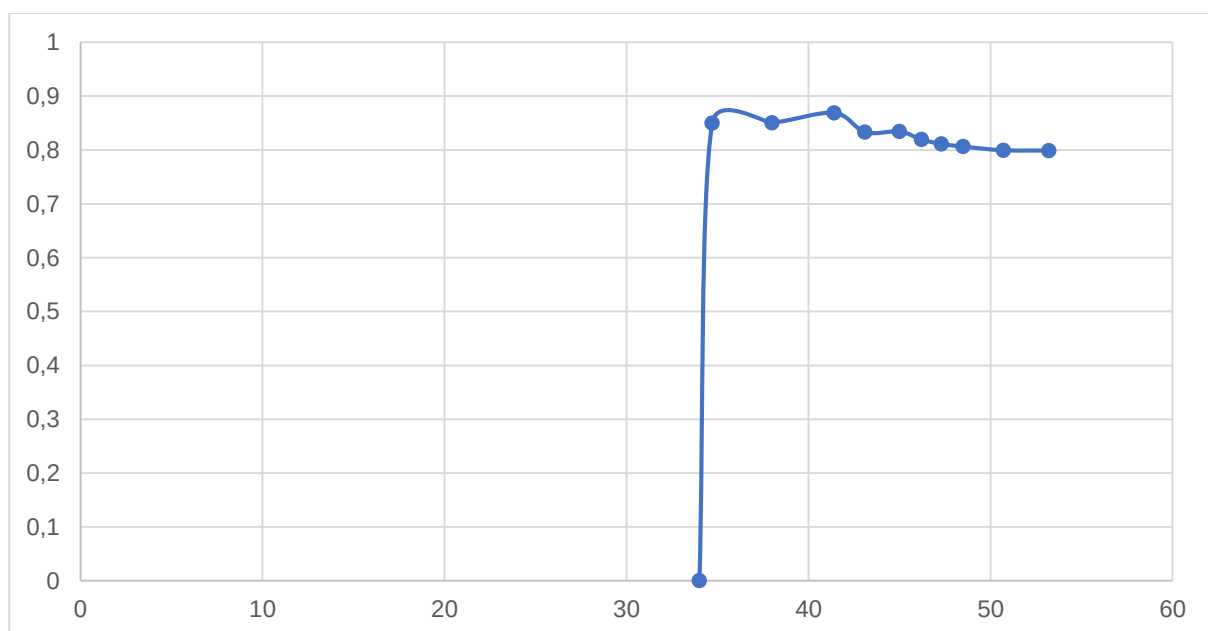


Ilustración 57 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 40 °C

Graficas de datos conjuntos

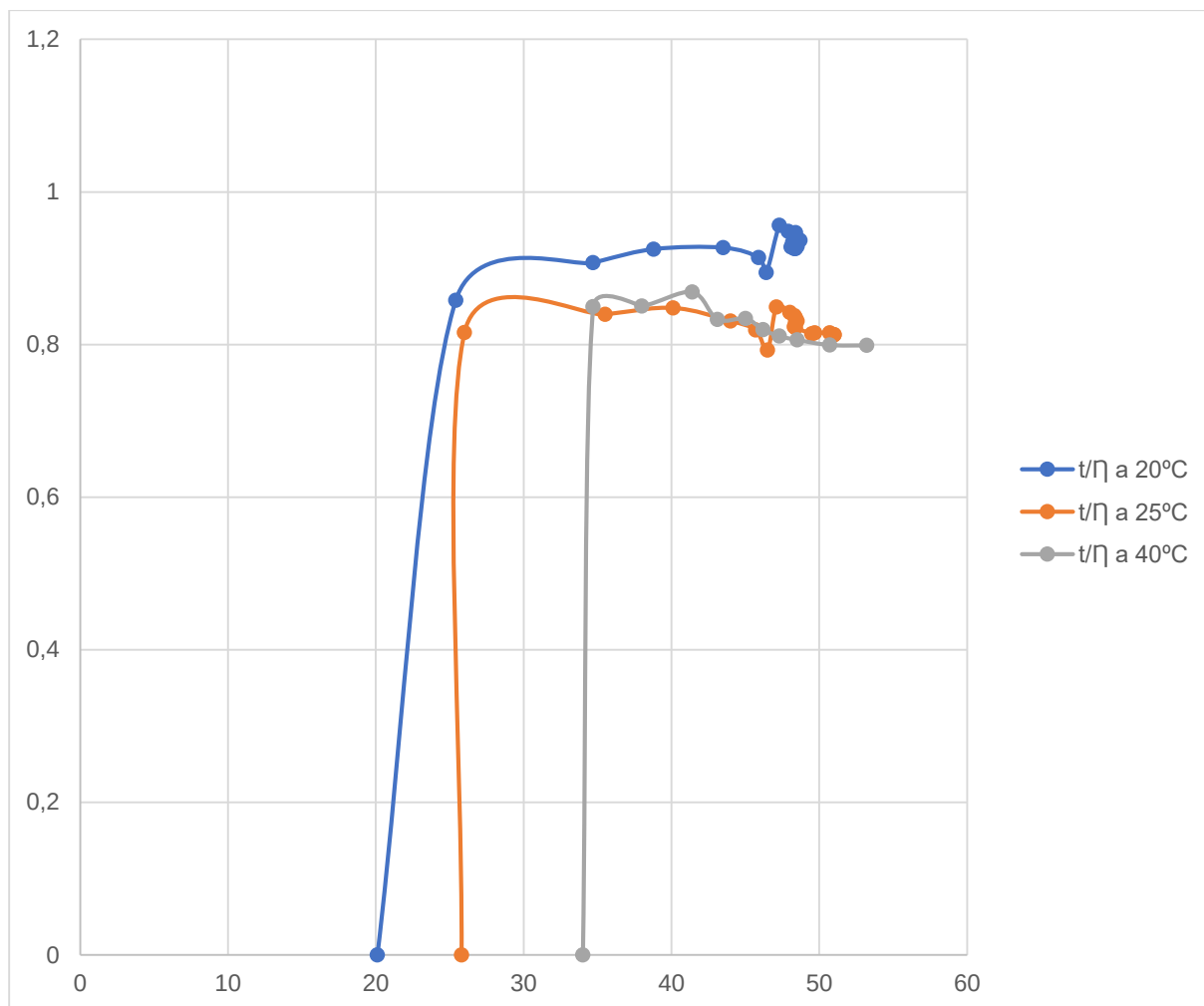


Ilustración 58 Grafica temperatura rendimiento del motor 3 kW, de las distintas temperaturas

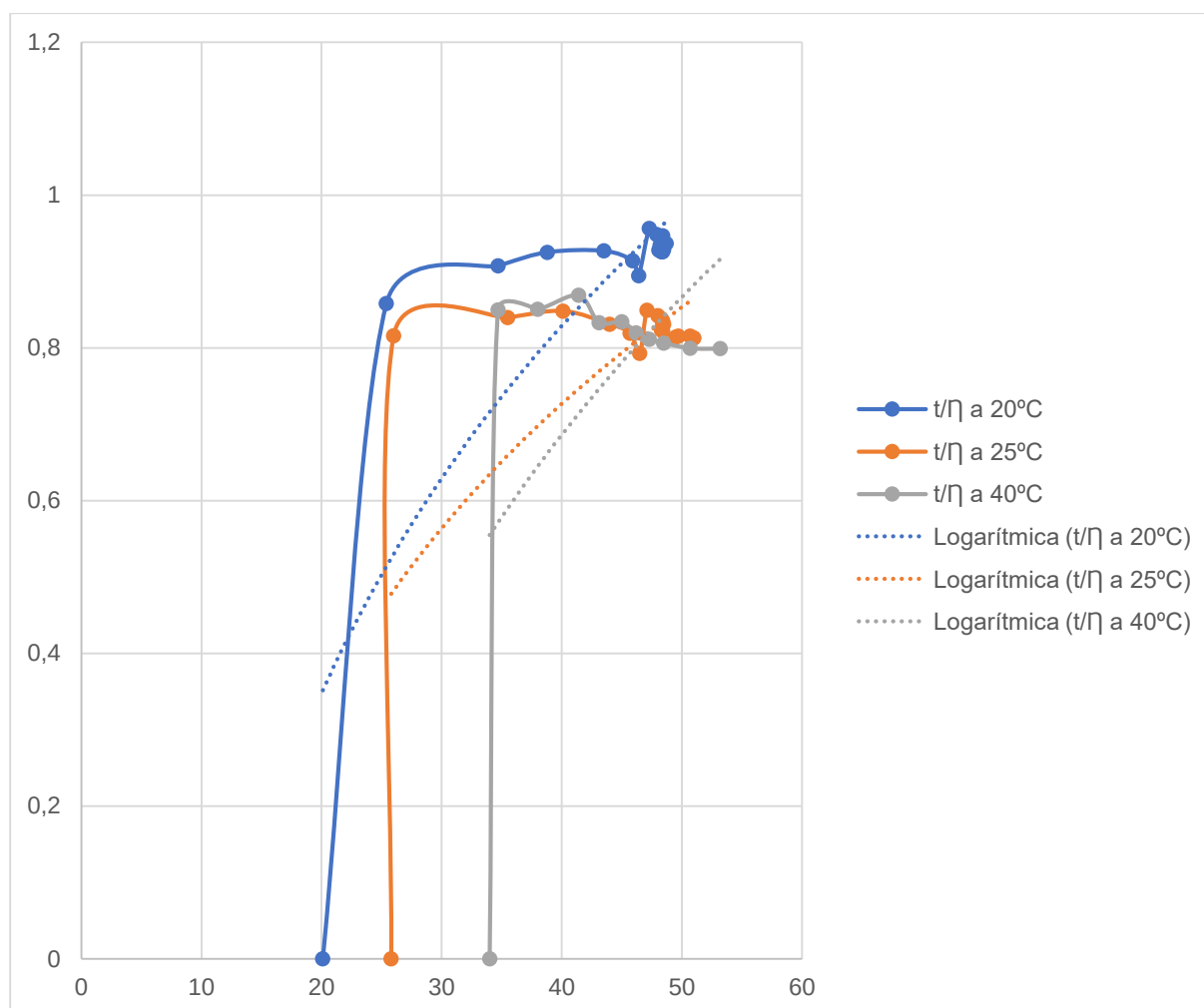


Ilustración 59 Gráfica temperatura rendimiento del motor 1,5 kW, de las distintas temperaturas. Añadiendo líneas de tendencia.

4.4 Proceso de trabajo

Todos los ensayos se parten desde vacío en el arranque. En el ensayo de aumento de carga progresiva. El tiempo de espera en cada etapa de carga se hacía con un tiempo fijo de espera, que era unos 10 minutos o con tiempo de espera variable, esperando que la temperatura del motor fuera estable.

En el ensayo de carga constante tras el arranque en vacío se pasa a una carga determinada. Ensayada previamente para que la potencia no exceda el 125% de la potencia nominal del motor. el tiempo medio entre medidas del motor es de unos 10 minutos salvo en casos que se haya anotado algún problema. Por ejemplo, cambio de vibración o sonido del motor por un transitorio.

En el ensayo a 40 °C el tiempo de medidas se ha distanciado debido a la incomodidad del lugar de trabajo. Haciendo necesario salir de la sala por la alta temperatura ambiente.

Calculo de datos

La potencia absorbida de la red por el motor (P_{abs}) se mide directamente con el analizador de redes. la tensión de la carga (V_{car}) y la intensidad de la carga (I_{car}) se miden directamente con dos multímetros. La potencia de la carga (P_{car}) y por tanto la potencia útil del motor se calcula mediante la expresión:

$$P_{car} = V_{car} * I_{car} * \cos \rho \quad (4.4-1)$$

Siendo el coseno de ρ de valor igual a 1 puesto que la carga es resistiva pura. Quedando la ecuación como:

$$P_{car} = V_{car} * I_{car} \quad (4.4-2)$$

El valor de la temperatura del motor (t) es medido directamente. Quedando solo como variable para calcular el rendimiento (η), de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{P_{car}}{P_{abs}} \quad (4.4-3)$$

Un cálculo de rendimiento normal puesto que la potencia absorbida es la potencia de entrada y la potencia de carga es la potencia útil, potencia salida del motor.

4.5 Calculo de la climatización de la sala de trabajo

La elección correcta de la climatización de la sala de trabajo de los motores de inducción redundará en una mayor eficiencia energética además de unos costes de instalación y mantenimiento menores. Una climatización insuficiente será inútil y una

mucha mayor disparará los costes de operación. Una climatización muy mayorizada provocara que la temperatura se alcance demasiado rápido. Produciendo la desconexión y conexión del compresor muy amenudo. Cada ciclo de desconexión conexión provoca un consumo seis veces mayor a cuando está en periodo de funcionamiento.

Los motores eléctricos proporcionan calor sensible al funcionar, cuando estos se encuentran dentro de la corriente de aire o dentro del espacio acondicionado, esta ganancia se debe considerar.

Los equipos de aire acondicionado se fabrican en capacidades por toneladas o su normalmente se usa su equivalencia en energía denominado frigoría (una tonelada de refrigeración equivale a tres mil frigorías). En una búsqueda de la eficiencia en el consumo mediante cálculos, he seleccionado el que mejor se adapta a la tarea de mantener el clima de trabajo. Teniendo en cuenta las características y el tamaño del laboratorio.

punto			cantida d	factor					cantidad X factor
				grados de diseño exterior					
				zona norte		centr o	zona sur		frigorías/ h
				32	35	38	41	43	
suelo			40,5	6	8	13	19	25	769,5
volumen de la habitación			101,25	5					506,25
ventanas expuestas al sol	S o E			115	120	135	15 0	16 5	0
	SO			210	220	230	24 0	26 0	0
	O			285	300	315	33 0	34 5	0
	NO o SE			155	165	175	19 0	20 5	0
ventanas no expuestas al sol			3	30	40	55	70	85	210
pared expuesta al sol				30	36	45	50	57	0
todas las paredes no expuestas al sol			11,25	17	25	37	45	55	506,25
tabiques (paredes interiores)			56,25	8	11	17	21	25	1181,25
tejad o	techo con espacio sin acondicionar		40,5	6	8	13	19	45	769,5
	tech o	sin aislamiento		22	27	35	40	45	0

	50mm o más de aislamiento		8	8	11	11	14	0
	tejado sin aislamiento		46	53	59	66	72	0
personas		1	120					0
luces y equipos eléctricos	equipos	7500	0,86					6450
	fluorescentes	600	1,0625					637,5
carga de la refrigeración total			frigorías/h					11030,2 5

Tabla 29 Cálculo de las frigorías necesarias para la climatización del laboratorio

CAPITULO CINCO

conclusiones

5.1 Comparación de datos

5.1.1 Motor de 1'5 kW

Valores a máximos alcanzados con el ensayo con aumento de carga progresiva.

t (°C)	η
44,5	0,341822

Tabla 30 a 20°C con 55% de la carga

t (°C)	η
44,8	0,342066

Tabla 31 a 23°C con 40% de carga

t (°C)	η
39,9	0,625479

Tabla 32 a 25°C con 60% de carga

Valores constantes alcanzados con el ensayo a rendimiento constante. Todos con un 60% de carga.

t (°C)	η
56,8	0,807828
56,6	0,805517
56,6	0,805406

Tabla 33 a 20°C

t (°C)	η
57	0,869788
56,8	0,867179
56,5	0,867179

Tabla 34 a 25°C

t (°C)	η
53,8	0,794782
57,9	0,784863
59,8	0,793782

Tabla 35 a 40°C

5.1.2 Motor de 2'2 kW

Valores a máximos alcanzados con el ensayo con aumento de carga progresiva.

t (°C)	η
41,8	0,66086

Tabla 36 a 20°C con 80%

t (°C)	η
42	0,61934

Tabla 37 a 23°C con 50% carga

t (°C)	η
42,3	0,75099

Tabla 38 a 25°C con 85% carga

Valores constantes alcanzados con el ensayo a rendimiento constante. Todos con un 80% de carga.

t (°C)	η
40,2	0,743647
40,1	0,744512
40,1	0,743647

Tabla 39 a 20°C

t (°C)	η
44,4	0,73935
44,3	0,744936
44,1	0,744954

Tabla 40 a 25°C

t (°C)	η
46,4	0,725444
46,5	0,711657
46,3	0,711657

Tabla 41 a 40°C

5.1.3 Motor de 3 kW

Valores a máximos alcanzados con el ensayo con aumento de carga progresiva.

t (°C)	η
44,2	0,961271

Tabla 42 a 20°C 90%

t (°C)	η
44	0,460836

Tabla 43 a 23°C 65%

t (°C)	η
45,2	0,953795

Tabla 44 a 40°C 100%

Valores constantes alcanzados con el ensayo a rendimiento constante. Todos con un 100% de carga.

t (°C)	η
--------	--------

40,2	0,743647
40,1	0,744512
40,1	0,743647

Tabla 45 a 20°C

t (°C)	η
44,4	0,73935
44,3	0,744936
44,1	0,744954

Tabla 46 a 25°C

t (°C)	η
46,4	0,725444
46,5	0,711657
46,3	0,711657

Tabla 47 a 40°C

5.2 Análisis de los datos obtenidos

Se puede observar que todos los rendimientos obtenidos en el ensayo de carga constante son superiores a sus homónimos al ensayo de aumento de carga progresiva. Esto no es ninguna novedad, los motores eléctricos presentan mejor rendimiento en una demanda de trabajo constante que en una demanda de trabajo variable.

También queda visto rápidamente que la temperatura estable de trabajo del motor aumenta conforme aumenta la temperatura ambiente. No así su rendimiento.

El presente trabajo de fin de grado partía de la premisa que las características y el rendimiento del motor se ven afectadas por la temperatura ambiente de la zona de trabajo del motor. Siendo más concretos disminuían. Para observar esto se saca el valor medio de rendimiento de cada ensayo y se compara con el rendimiento a 20 °C de cada tipo de ensayo.

20°C	23°C	25°C
21,96705	21,02235	37,7731091
valor base	-0,9447	15,8060591

Tabla 48 motor de 1'5 kW ensayo con aumento de carga

20°C	23°C	25°C
47,3928824	53,36491	63,6433278
valor base	5,97202765	16,2504454

Tabla 49 motor de 2'2 kW ensayo con aumento de carga

20°C	23°C	25°C
------	------	------

70,4844762	27,71009	69,0898238
valor base	-42,7743862	-1,39465238

Tabla 50 motor de 3 kW ensayo con aumento de carga

20°C	25°C	40°C
80,708365	84,030505	79,33662
valor base	3,32214	-1,371745

Tabla 51 motor de 1'5 kW ensayo a carga constante

20°C	25°C	40°C
0,76046144	0,76281044	0,75325554
valor base	0,002349	-0,0072059

Tabla 52 motor de 2'2 kW ensayo a carga constante

20°C	25°C	40°C
92,6527421	82,5578737	81,4566714
valor base	-10,0948684	-11,1960707

Tabla 53 motor de 3 kW, ensayo a carga constante

Una vez ordenados todos los valores estables finales de los ensayos. Se aprecia que en el ensayo a carga constante. Los ensayos a 40°C siempre tienen una pérdida de rendimiento con respecto a los valores comprendidos entre 20°C y 25°C. no obstante, la pérdida es mucho menor a la esperada, más aun teniendo en cuenta que a una temperatura de 40°C comienzan a trabajar en el límite superior de temperatura ambiental para lo que fueron diseñados. Las pérdidas se preveían más acuciadas.

Pese a que experimentalmente se puedan alcanzar valores razonables de rendimiento a una temperatura ambiente tan alta. No es aconsejable en ningún momento alcanzar dicho valor. Debido al decremento de la esperanza de vida de la máquina que esto supondría.

5.2.1 Climatización de la sala

Por lo mencionado anteriormente sobre problemática de trabajar en el límite superior de temperatura para la que fueron diseñados los motores. Combine tener presente la climatización. En concreto la eficiencia y el gasto del mismo. En el caso del laboratorio de máquinas eléctricas sale un requerimiento para las necesidades de trabajo de 11030'25 frigorías/h. la conversión de frigorías a vatios es de un vatio por cada 0'85 frigorías. Dando un resultado de: 12976'76471 que simplificando queda 13 kW. Con tal consumo eléctrico queda constatado que el uso del aire acondicionado con el fin de mejorar el rendimiento del motor bajando la temperatura ambiente queda descartado. Quedando así su uso con mero objeto de la protección de los equipos.

En lo referente al primer tipo de ensayo en el que las temperaturas analizadas variaban entre 20 y 25 °C por tanto el uso del climatizador estaría restringido a un par de grados. Es de mencionar que la bajada de un grado en la climatización supone un aumento de un 8% del consumo eléctrico, con respecto a la energía consumida de partida. En todos los ensayos comprendidos entre las anteriormente mencionadas temperaturas y en cualquiera de los dos tipos de ensayos, los valores han sido parecidos o con una diferencia mínima, siendo los resultados con gran variación explicado por otros motivos, expuestos más adelante.

Siendo las diferencias encontradas menores al 6% y no siendo siempre emparentadas a una menor temperatura. Hace innecesario el mantener la climatización en una temperatura baja, por:

- Mayor gasto en climatización que no se verá recompensado en eficiencia del motor.
- A temperaturas comprendidas en los valores mencionados, la integridad del material queda asegurada por el fabricante.

Finalmente se puede afirmar que la variación de temperatura comprendidas en valores próximos a los que marca la norma UNE-EN 60034-2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos, que menciona el uso de una temperatura de 25 °C para la normalización del ensayo. No influye en el rendimiento de los motores objeto de estudio. Si influyendo en el caso de la temperatura de 40 °C la cual marca el límite dado por el fabricante. Aun influyendo en el caso de la temperatura de 40 °C la pérdida de rendimiento es asumible. Debiendo actuar en la climatización por la seguridad de la integridad del motor que por su déficit de rendimiento.

5.2.2 Alineación y ajuste de los motores

Los ensayos con una variación en los datos mayor a un 16% de variación, no son ensayos en que simplemente influya la temperatura ambiente para justificar la variación. En estos ensayos la alineación de la máquina no ha sido bien equilibrada, produciendo pérdidas adicionales por rozamiento.

Por ejemplo, queda patente en el caso del ensayo con aumento de carga progresiva con el motor de 1'5 KW. En los ensayos a 20 °C y 23 °C, se llegó a una carga del 40% Escuela politécnica Superior de Jaén

como valor máximo y haciendo uso del 125% de mayorización del motor. Por el contrario, en el ensayo a 25 °C de un 60% como valor de carga.

Carga (%)	V _{car} (V)	I _{car} (A)	P _{car} (W)	P _{abs} (KW)	η
(vacío)	160,5	0	0	0,7	0
5	155,8	0,59	91,922	0,6	0,153203
5	154,5	0,64	98,88	0,6	0,1648
10	151	0,64	96,64	0,6	0,161067
10	150	1,25	187,5	0,6	0,3125
15	148,6	1,25	185,75	0,6	0,309583
15	147,7	1,85	273,245	0,7	0,39035
25	147	1,85	271,95	0,7	0,3885
25	146,3	2,45	358,435	0,7	0,51205
30	145,8	2,45	357,21	0,7	0,5103
30	144,9	3,03	439,047	0,7	0,62721
40	144,5	3,03	437,835	0,7	0,625479
40	143,6	3,6	516,96	0,7	0,738514
50	143,3	3,6	515,88	0,7	0,736971
50	141,8	4,74	672,132	0,7	0,960189
60	141,3	4,74	669,762	0,7	0,956803

Tabla 54 ensayo motor 1'5 kW, de aumento de carga progresiva, completo

Esto puede ser debido a que los ensayos fueron realizados del siguiente orden. Primer ensayo a 20 °C de cada motor, segundo ensayo a 20 °C de cada motor, primer ensayo a 23°C de cada motor, etc. Haciendo que antes de cada ensayo se produjese el montaje y alineado del motor.

Se estimó oportuno trabajar aprovechando el clima imperante en ajen en cada momento. Realizándose la primera serie de ensayos en primavera y la última a 40 °C en verano. Con el objetivo del ahorro al no ser necesario el ajuste tan brusco de temperatura en el laboratorio.

Conforme se avanzó en el trabajo la habilidad y la calidad del ajuste del motor mejoró. Dando lugar a que no se encuentren errores en las temperaturas de 25 °C y 40 °C.

Como conclusión: sea cual sea el uso del motor, se deben tomar las medidas necesarias, así como el tiempo requerido, para que el ajuste y alineación del motor sean óptimos. Evitando de esta forma que motores que cuya finalidad es el uso industrial, su eficiencia sea la máxima posible. Lo que redundara en un ahorro de costes por consumo, mantenimiento y unos mayores beneficios por el trabajo realizado.

5.2.3 Transitorios

En el ensayo del motor de 3 KW a una temperatura de 23 °C. La diferencia con los datos a 20 °C y 25 °C se explican como problemas transitorios surgidos en el motor procedente de la red. No pudiéndose registrar en video o cualquier otro método el cambio de sonido y las revoluciones de giro del motor. Dando como resultado un desempeño mucho más pobre que los otros dos ensayos homónimos.

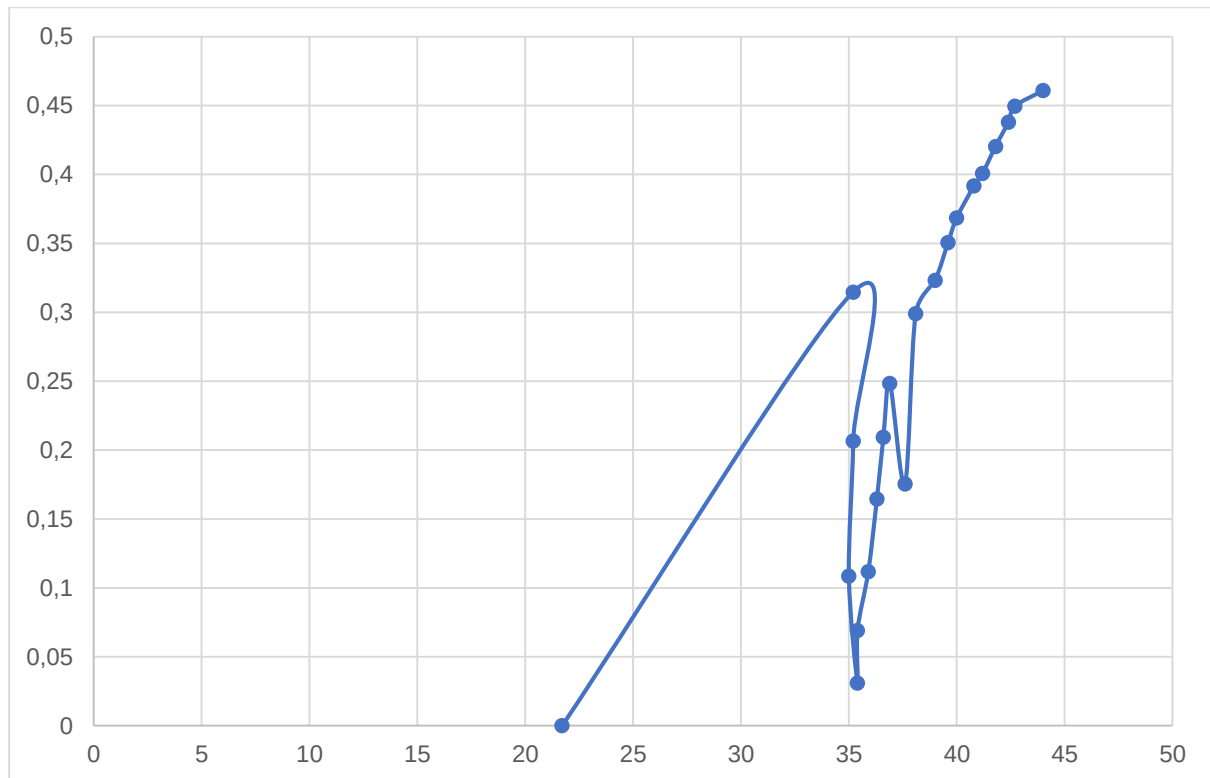


Ilustración 60 Gráfica temperatura rendimiento del motor 3 kW, a 23 °C, en el ensayo de aumento de carga progresiva

5.3 Desde el punto de vista practico

Tras el estudio queda patente que la influencia de la temperatura ambiente en condiciones normales de trabajo queda descartada. Por el contrario, se demuestra el rango de temperaturas que las maquinas pueden ser usadas, dadas por el fabricante.

Para el consumidor esto supone un ahorro de costes y de control del motor quedando asegurado el buen desempeño del mismo, pese a las variaciones de temperatura de forma discreta.

Considerando que la temperatura ambiente también debe venir marcada por la comodidad de los operarios de las máquinas de inducción. Que es recomendado que la climatización en zonas de trabajo varíe más allá de 12 °C con respecto al exterior, por criterios de salud. Marcando una temperatura de unos 24/26 °C, produce un buen clima de trabajo tanto para máquinas como para operarios.

Reduciendo los problemas de desgaste prematuro de los motores por altas temperaturas, problemas de salud humana derivado de climas con calor extremo y reduciendo el consumo eléctrico al no ser necesario temperaturas bajas para el uso óptimo del motor.

Bibliografía

UNE-EN 60034-1(2010). Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.

UNE-EN 60034-2-1. (Octubre de 2009). Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos.

UNE-EN 60034-28. (Diciembre de 2013). Máquinas eléctricas rotativas. Parte 28. Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula trifásicos de baja tensión.

UNE-EN 60034-30. (Marzo de 2009) Máquinas eléctricas rotativas Parte 30: Clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única (código IE).

UNE-EN 61986. (2003). Máquinas eléctricas rotativas. Carga equivalente y técnicas de superposición. Ensayos indirectos para determinar el calentamiento.

ABB. Catalogo para motores de inducción trifásicos en baja tensión.

Chapman, S. (2012). Máquinas Eléctricas (5 ed.). McGraw-Hill.

Fitzgerald, A. (1992). Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill. Fraile Mora, J. (2015). Máquinas eléctricas (7 ed.). Garceta.

IEEE 112-2004. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.

Krause, P. (2002). Analysis of Electrical Machinery (2 ed.). New York: McGraw-Hill.

Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives. Springer.

Máquinas Asíncronas. Obtenido de <http://www.tuveras.com/máquinasca/máquinasca.htm> Meisel, J. (1984).

Ley de Paschen obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Paschen

Ong, C. M. (1997). Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab-Simulink.

Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova. (1984). Polyphase motors: a direct approach to their design.

Salon, S. (1995). Finite Element Analysis of Electrical Machines. Springer. Juan Miguel Jiménez Ordóñez Estimación de los parámet.

Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Puche Panadero, R. (2010) Aplicaciones Técnicas Industriales de Motores de Inducción.

Artículo “Efecto de la temperatura en la eficiencia de motores industriales”
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1247>

Artículo “selección y aplicación de motores eléctricos”
<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-seleccion-y-aplicacion-de-motores-electricos-articulo-tecnico-espanol.pdf>