

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



**“PROPUESTA DE CONVERSIÓN DE SISTEMA MOTRIZ DE UNA BANDA
TRANSPORTADORA A TECNOLOGÍA MECATRÓNICA PARA
OPTIMIZACIÓN DE SU CONSUMO ENERGÉTICO”**

**Informe de práctica de especialidad para optar por el título de Ingeniero en
Mantenimiento Industrial con el grado académico Licenciatura**

REALIZADO POR:
Gabriel Villarreal Alfaro

Cartago Julio, 2019



Carrera evaluada y acreditada por:

Canadian Engineering Accreditation Board

Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes d'Ingénierie

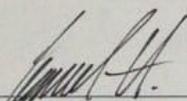
CARTA DE ENTENDIMIENTO

Fecha: 27/7/19

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas del Tecnológico

Yo Gabriel Villarreal Alfaro
carné No. 200938777, si autorizo no autorizo, al Sistema de Bibliotecas del Tecnológico
(SIBITEC), disponer del Trabajo Final de graduación, del cual soy autor, para optar por el grado
de Licenciatura, en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento
Industrial, presentado en la fecha 29/7/19, con el título
Propuesta de conversión de sistema motor de una banda
transportadora a tecnología mecatrónica para optimización de su
consumo energético.

para ser ubicado en el Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC, con el objetivo de ser visualizado a través de la red Internet.

Firma de estudiante: 
Correo electrónico: gvalfaro14@gmail.com
Cédula No.: 1-1478-0014

Profesor Asesor

Ing. Luis Gómez Gutiérrez

Asesor Industrial

Ing. Jorge Álvarez Mejías

Tribunal Examinador

Ing. Gustavo Gómez Ramírez

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Datos personales

Nombre completo: Gabriel Villarreal Alfaro

Número de cédula: 1-1478-0014

Número de carné: 200938777

Edad: 27

Correos electrónicos: gvalfaro14@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: 100 metros este y 25 sur de Tribunales de Justicia, Grecia, Grecia, Alajuela.

Información del proyecto

Nombre del proyecto: Propuesta de conversión de sistema motriz de una banda transportadora a tecnología mecatrónica para optimización de su consumo energético.

Profesor asesor: Ing. Luis Gómez Gutiérrez

Horario de trabajo del estudiante: Lunes a Viernes de 8:00 am - 5:00 pm

Datos de la Empresa

Nombre: LABS de Costa Rica, S.A.

Actividad Principal: Proveedor de servicios, ingeniería y equipos electromecánicos para la industria en general.

Dirección: Diagonal a iglesia católica de Río Segundo, Alajuela, Costa Rica.

Asesor industrial: Ing. Jorge Álvarez Mejías

DEDICATORIA

A mi familia, mi padre Carlos y mi hermano Daniel, por su incansable apoyo, compañía y amor incondicional durante toda esta linda etapa de vida.

A mi amada madre Alba, por darme el regalo más grande y ser quien hoy cuida de mí en cada momento desde su descanso.

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros y amigos Jorge, Diego por la oportunidad de aprender a su lado.

Al profesor Luis Gómez por su consejo y guía durante este proceso de formación.

A toda la familia de LABS por su confianza y la oportunidad de ser parte de sus ideales.

A todos mis amigos que de una u otra manera han sido motores de voluntad.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO.....	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Reseña de la Empresa.....	17
CAPÍTULO 2 . DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	19
2.1 Antecedentes.....	19
2.1.1 COCA COLA CLEVELAND, TN (caso de éxito)	19
2.1.2 COCA COLA VIENNA (caso de éxito)	20
2.1.3 Cervecería Tsingtao, China (caso de éxito)	21
2.2 Planteamiento del problema	22
2.3 Justificación	24
2.4 Viabilidad	25
2.5 Objetivos.....	26
2.5.1 Objetivo General:	26
2.5.2 Objetivos Específicos:.....	26
2.6 Metodología.....	27
2.7 Alcance	28
CAPÍTULO 3 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	30
3.1 Potencia eléctrica.....	30
3.2 Eficiencia energética (EE)	30
3.3 Ahorro energético	31
3.4 Torsión rotacional de un motor eléctrico.....	32
3.5 Métodos para la determinación de la eficiencia de motores eléctricos asíncronos de inducción	32
3.6 Métodos para la determinación de la eficiencia en condiciones de campo de motores eléctricos asíncronos de inducción	33
3.7 Motor eléctrico de reluctancia sincrónica asistido por magnetismo permanente	35
3.8 Pérdidas de potencia de conductores	36
3.9 Variador de frecuencia eléctrica	37
3.10 Redes y comunicación de señales.....	38

3.10.1 Señal	38
3.10.2 Señal Digital	38
3.10.3 Dirección IP	39
3.10.4 EtherNet	39
3.11 Movigear	41
CAPÍTULO 4 Diagnóstico de la instalación electromotriz	46
4.1 Especificaciones por unidad	46
4.2 Condiciones operativas	51
4.2.1 Estimación de carga	52
4.2.2 Estimación de frecuencia eléctrica de operación	54
4.2.3 Estimación de torque de salida nominal y operativo	55
4.3 Estimación de demanda de potencia eléctrica	56
4.4 Estimación de consumo eléctrico	56
4.5 Resultados de la condición operativa actual electromotriz	58
CAPÍTULO 5 . Diseño del sistema mecatrónico substituto	65
5.1 Selección del modo de control e instalación	65
5.2 Dimensionamiento y selección de la unidad Movigear preliminar por catálogo	67
5.3 Dimensionamiento y selección de la unidad Movigear a través de programa <i>Workbench</i>	68
5.4 Selección de cables y conectores	72
5.5 Selección del controlador o direccionador para modo de instalación SNI	73
CAPÍTULO 6 . VALIDACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SISTEMA MECATRÓNICO	75
6.1 Validación técnica	75
6.2 Validación económica	77
7. CONCLUSIONES	82
8. RECOMENDACIONES	83
9. BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	86
A- Topolopolía propuesta para panel 1	86
B- Topolopolía propuesta para panel 2	87

C-	Topopolía propuesta para panel 3	88
D-	Topopolía propuesta para panel 4.....	89
E-	Topología propuesta para panel 5	90
F-	Topología propuesta para panel 6.....	91
G-	Especificación técnica de MOVIFIT FDC	92
H-	Especificación técnica de Movigear versión B control distribuido SNI.....	93
I-	Especificación técnica de Movigear versión B control DBC	94
J-	Especificación técnica de cableado prefabricado y conectores apantallados EMC ..	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Grupo de marcas y sus equipos industriales con representación exclusiva y autorizada por LABS de Costa Rica, S.A.....	18
Figura 2.1. Metodología de desarrollo del proyecto.....	27
Figura 2.2. Diagrama de instalación para control centralizado (izquierda) y descentralizado (derecha)	28
Figura 3.1. Curvas características para un motor trifásico asíncrono de 30hp de potencia marca WEG.	35
Figura 3.2. Sección de un motor de reluctancia sincrónica asistido por magnetismo permanente. En azul, los imanes permanentes incrustados en el rotor del motor eléctrico.	36
Figura 3.3. Representación de una red de comunicación EtherNet y su jerarquía de operación de elementos.	40
Figura 3.4. Estructura general de un motorreductor gama Movigear®.....	41
Figura 3.5. Ejemplos de topología para los modos de control e instalación.	45
Figura 4.1. Placa típica de un motorreductor marca SEW Eurodrive.	46
Figura 4.2. Motorreductor SEW Eurodrive ubicado en “línea panes”.	47
Figura 4.3. Diagrama de distribución de secciones de transportadores para línea panes... ..	49
Figura 4.4. Unidad 42 ubicada en sección 4: transportadores de moldes.....	55
Figura 5.1. Topología de red de unidades alimentadas y controladas desde el panel 1.	66
Figura 5.2. Selección preliminar de catálogo de reemplazo para unidad 43 de “línea panes”.	68
Figura 5.3. Representación de la sección transversal para el cable de comunicación para modo de control SIN.....	72
Figura 5.4. Dispositivo Movifit FDC.	73
Figura 6.1. Gráfico de desempeño de unidad 43 para el estado de carga estimado.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Consumo de potencia de unidad convencional vs Movigear en un periodo de 13 días de medición	19
Tabla 3.1. Características principales de los modos de control e instalación para la gama Movigear®.....	44
Tabla 4.1. Extracto de identificación de unidades en Sección 1: Transportadores de masas	50
Tabla 4.2. Ejemplo de tabulación de datos específicos	51
Tabla 4.3. Lista de recetas producidas en "línea panes"	51
Tabla 4.4. Porcentaje de carga operacional de los motores en Sección 1	53
Tabla 4.5. Extracto de valores de velocidad real, nominal y de frecuencia parametrizada en la unidad 42.	54
Tabla 4.6. Resultado de estimación de potencia eléctrica demandada por la unidad 42....	56
Tabla 4.7. Valores operativos actuales de desempeño promedio y consumo total de las unidades en "línea panes" según su categoría de eficiencia nominal.....	59
Tabla 5.1. Datos de torque entregado estimado y velocidad de eje de salida medida para unidad 43 de "línea panes"	67
Tabla 5.2. Listado de equipos requeridos para el diseño propuesto y costo adquisitivo de mercado	69
Tabla 5.3. Condiciones y valores de proceso para simulación de carga de unidades Movigear	70
Tabla 5.4. Estimación de programa <i>Workbench</i> de parámetros de funcionamiento para unidad 43 con equipo Movigear tamaño 2	71
Tabla 6.1. Tarifa de energía eléctrica de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia....	78
Tabla 6.2. Consumo energético total de las 50 unidades de línea panes actual y estimado para el sistema propuesto de la gama Movigear.....	78
Tabla 6.3. Resultado de análisis de inversión de la propuesta proyectado a 10 años (valores en dólares).....	80

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Valores de placa de eficiencia, intensidad de corriente nominal y operativa para las unidades de “línea panes” con categoría de eficiencia IE1.....	60
Gráfico 4.2. Valores de placa de eficiencia, intensidad de corriente nominal y operativa para las unidades de “línea panes” con categoría de eficiencia IE2.....	61
Gráfico 4.3. Valores de placa de eficiencia, intensidad de corriente nominal y operativa para las unidades de “línea panes” con categoría de eficiencia IE3.....	62
Gráfico 4.4. Tendencia de eficiencia a 100% de carga y eficiencia al porcentaje de carga estimado para la receta “Pan blanco 560 gramos” en todas las unidades de “línea panes”.	63

RESUMEN EJECUTIVO

La propuesta presentada se desarrolla en torno al aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos para la producción continua en una empresa de alimentos. Al estar presente en un mercado altamente competitivo, resulta necesario gestionar el diseño e integración de una planta física cada vez más eficiente dando como resultado la optimización de recursos energéticos. El estudio aquí presentado corresponde a una propuesta por parte de la empresa LABS de Costa Rica SA como proveedor para una empresa de la industria de alimentos panificados.

La implementación de los sistemas mecatrónicos en los procesos productivos ha tomado gran importancia en los últimos años para llevar a cabo un control preciso de carga de trabajo y mejorar el aprovechamiento de la energía requerida para dicha labor. Este proyecto se centra en los mecanismos moto-reductores transmisores de potencia para una cinta transportadora de productos panificados la cual es de gran relevancia para una empresa del sector alimenticio. La optimización del consumo energético se logra mediante el uso de dispositivos moto-reductores tipo mecatrónicos de eficiencia “super premium” clase IE4 e IE5 acorde con normativa IEC 60034-30-1/2014.

Este proyecto se constituye de un diagnóstico de la instalación eléctrica y de control presente de los motorreductores eléctricos de la banda transportadora identificada como “línea panes”, luego se analiza la alternativa con escenario de conversión por tecnología mecatrónica propietaria de la marca SEW Eurodrive y la gama Movigear, de la cual se obtienen los resultados de consumo energético simulando el régimen operativo de cada motorreductor a través del programa Workbench de SEW, con la intención de traducirlo en ahorro económico para su posterior evaluación de indicadores económicos de la inversión del proyecto, VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Retorno) y PR (Periodo de Recuperación).

Palabras claves: consumo energético, ahorro, motorreductor, eficiencia, mecatrónico

ABSTRACT

The proposal presented is developed around the optimal use of energy resources for continuous production in a food company. Being present in a highly competitive market, it is necessary to manage the design and integration of an increasingly efficient physical plant resulting in the optimization of energy resources. The study presented here corresponds to a proposal by the company LABS de Costa Rica SA as a supplier for a company in the bakery food industry.

The implementation of mechatronic systems in production processes has taken great importance in recent years to carry out a precise control of workload and improve the use of the energy required for such work. This project focuses on the power-reducing motor-reducing mechanisms for a conveyor belt of baked goods which is of great relevance for a company in the food sector. The optimization of energy consumption is achieved through the use of mechatronic-type mechatronic devices of “*super premium*” efficiency class IE4 and IE5 in accordance with IEC 60034-30-1 / 2014.

This project consists of a diagnosis of the electrical installation and control of the electric gearmotors of the conveyor belt identified as “bread line”, then the alternative is analyzed with a conversion scenario for mechatronic technology that owns the SEW Eurodrive brand and the Movigear range, from which the results of energy consumption are obtained simulating the operating regime of each motor operator through the SEW *Workbench* program, with the intention of translating it into economic savings for its subsequent evaluation of economic indicators of the project investment, VAN (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return) and PR (Recovery Period).

Key words: energy usage, savings, gearmotor, efficiency, mechatronic

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La propuesta presentada se desarrolla en torno al aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos para la producción continua en una empresa de alimentos. Al estar presente en un mercado altamente competitivo, resulta necesario gestionar el diseño e integración de una planta física cada vez más eficiente dando como resultado la optimización de recursos energéticos. El estudio aquí presentado corresponde a una propuesta por parte de la empresa LABS de Costa Rica SA como proveedor para una empresa de la industria de alimentos panificados.

La implementación de los sistemas mecatrónicos en los procesos productivos ha tomado gran importancia en los últimos años para llevar a cabo un control preciso de carga de trabajo y mejorar el aprovechamiento de la energía requerida para dicha labor. Este proyecto se centra en los mecanismos moto-reductores transmisores de potencia para una cinta transportadora de productos panificados la cual es de gran relevancia para una empresa del sector alimenticio.

La optimización del consumo energético se logra mediante dispositivos moto-reductores tipo mecatrónicos de eficiencia “super premium” clase IE4 e IE5 acorde con normativa IEC 60034-30-1/2014, la cual clasifica los motores monofásicos y trifásicos de 2, 4 ,6, 8 polos con potencia entre 0,12kW y 1000kW y de alimentación menor a 1000V CA (corriente alterna) a 50 o 60 Hz. Estos dispositivos son incorporados en una estructura de control distribuido con el fin de coordinar todas las etapas del transportador. Este proyecto se constituye de un diagnóstico de la instalación eléctrica y de control presente de los motorreductores eléctricos de la banda transportadora identificada como “línea panes”, luego se analizan diferentes alternativas con escenarios de conversión por tecnología mecatrónica de las cuales se obtiene la opción más conveniente para las intenciones tanto de factibilidad técnica como económica que tiene la empresa de panificados.

Los dispositivos mecatrónicos corresponden a un diseño patentado de la gama MOVIGEAR® propiedad del fabricante SEW-Eurodrive, los cuales consisten en unidades integrales de caja reductora tipo helicoidal de ejes paralelos, motor eléctrico (eficiencia “super premium” clase IE4 o IE5) y control electrónico de velocidad.

1.2 Reseña de la Empresa

LABS de Costa Rica, S.A., es una empresa ubicada en Río Segundo de Alajuela, dedica por más de 40 años a la comercialización de servicios, ingeniería de aplicación y ventas de equipos electromecánicos para industria general de alimentos, minería y agregados, reciclaje, entre otros relacionados.

Inicia sus operaciones en 1976 como una empresa familiar fundada por el Ing. Juan Carlos Soley Mohs, para atender la necesidad de insumos y equipos para la industria azucarera y en algunas otras industrias con el equipo completo para laboratorios de esos tiempos.

Con el tiempo y gracias a su buen desempeño fue adquiriendo diferentes representaciones y conocimientos que hicieron que LABS pudiera atender otras industrias.

Las diferentes representaciones incluyen marcas como ERIEZ MAGNETICS, SEW-EURODRIVE, MOYNO, ELMO RIETSCHLE, NASH, WAM, LUTZ-JESCO, entre otras, donde se han incorporado profesionales de la ingeniería y colaboradores para la comercialización de productos y equipos en Costa Rica y otros países de Centroamérica. Algunos de los clientes principales incluyen a GRUPO BIMBO, FIFCO, COCA COLA FEMSA, HOLCIM, CEMEX, GRUMA, CARGILL, INTEL, CHIQUITA, ICE, entre otros. Para mejorar la eficacia de la atención y la especialización en los campos de aplicación, se ha dedicado un ingeniero responsable de los proyectos de cada marca representada. El ingeniero de cada marca es quien se encarga de facilitar toda información pertinente el proyecto y de eventualmente realizar la gestión de venta de los equipos.

El accionar de LABS está presente al momento que se conoce la necesidad de una empresa por adquirir un equipo que les realice una operación particular. Una vez definido el requerimiento, el ingeniero a cargo de la marca de interés, reúne la información pertinente y crea una propuesta sugerida y cumpliendo las especificaciones técnicas de la aplicación. Los datos para la selección de equipos se obtienen de la comunicación con el cliente, observación y toma de medidas en campo y de bases de datos proporcionados por el fabricante a través de sus propios departamentos de ingeniería.

Al ser una empresa proveedora y de diseño de aplicación, gran parte de los equipos seleccionados se piden a medida al fabricante y requieren de cierto tiempo para su manufactura y entrega al cliente final luego de concretar la venta del proyecto. De esta labor de logística se encarga el departamento administrativo. En muchos casos, dependiendo del tipo de maquinaria comercializada, LABS ofrece servicios postventa de puesta en marcha y mantenimiento periódico, además de capacitaciones de operación de la maquinaria.

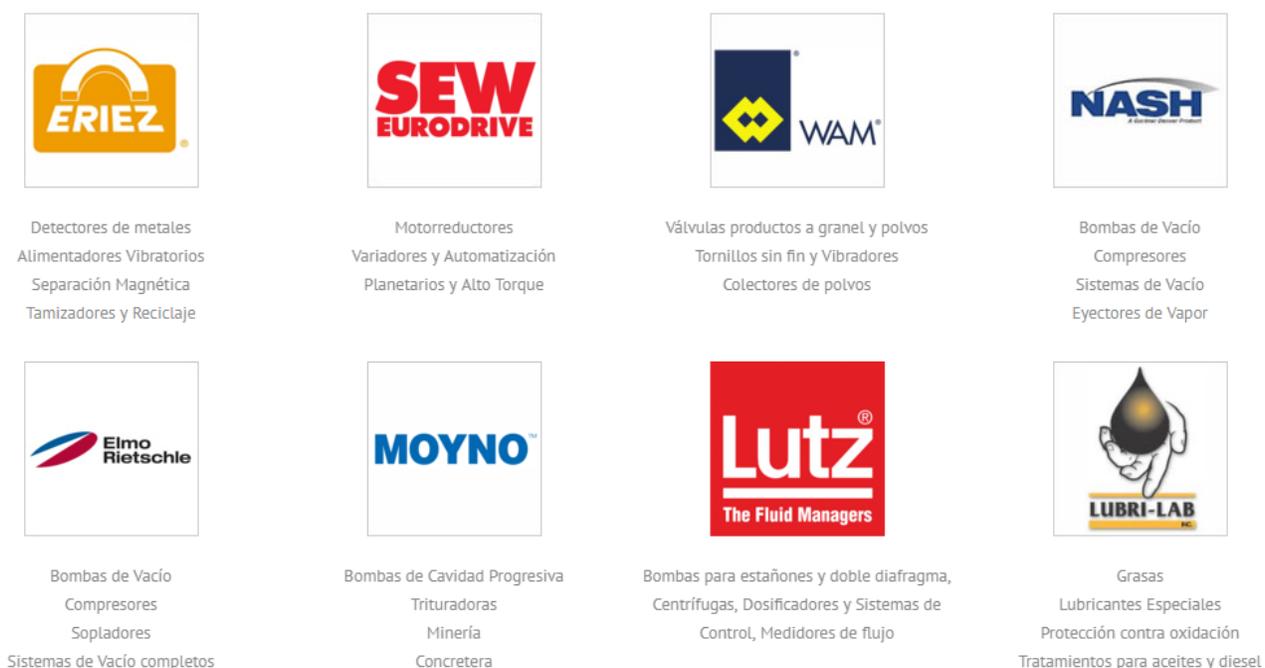


Figura 1.1 Grupo de marcas y sus equipos industriales con representación exclusiva y autorizada por LABS de Costa Rica, S.A.

Fuente: <http://www.labsr.com>

CAPÍTULO 2 . DEFINICIÓN DEL PROYECTO

2.1 Antecedentes

2.1.1 COCA COLA CLEVELAND, TN (caso de éxito)

En 2014, el ingeniero de aplicación Jeremy McCullough desarrolló un estudio en la empresa de bebidas COCA COLA en Cleveland, Tennessee en Estados Unidos donde se consideran las siguientes especificaciones y condiciones de operación para un motorreductor convencional con motor de inducción de jaula ardilla simple en comparación con un motorreductor de la gama MOVIGEAR:

- Motorreductor convencional: Modelo ST57DT90L4 / Potencia nominal 2 HP / 60hz / 4 polos / Alimentación 460V / Reducción de velocidad 16.47:1 / Accionamiento por contactor-arrancador directo / Nivel de eficiencia IE1
- Unidad MOVIGEAR: Modelo MGFTT2-DSM-DBC-B/ECR / Reducción de velocidad 18.52:1 / rango de velocidad de salida 0.05 a 108rpm / Par Nominal 74 Nm / Par Máximo 220 Nm / Accionamiento por señal binaria / Nivel de eficiencia IE4
- El periodo de estimación del consumo de energía es de 8736 horas al año para el cálculo del potencial de ahorro energético. Costo de la energía 6 centavos de dólar por kWh.

Tabla 2.1. Consumo de potencia de unidad convencional vs Movigear en un periodo de 13 días de medición

	Motor Convencional	MOVIGEAR	Consumo relativo
Potencia Activa promedio [W]	422	246	-42 %

Fuente: McCullough, J. (2014)

Para estas mismas unidades se realizó un análisis del costo total de reemplazo ampliado a periodo de 3 años incluyendo valoración del costo de la energía, costo de la instalación, costo de accesorios de accionamiento y control y el costo de mantenimiento por año. Los resultados indicaron una disminución del costo de 24 % a favor de la implementación de tecnología Movigear. De igual manera el estudio amplía la evaluación de una línea completa

considerando 60 unidades en una arquitectura de control centralizado (unidades convencionales) y descentralizado (tecnología Movigear). En este caso, además del consumo y la instalación propia individual de cada unidad, también se incluyen costos de instalación de paneles y cableado total, así como componentes de protección y accionamientos. Para este último caso los resultados indican un ahorro de 23 % al aplicar tecnología Movigear analizado en un periodo de 3 años con una diferencia cuantificada en \$62 000 dólares US.

Adicional al aspecto energético y económico, el estudio estima el potencial de reducción de emisiones de dióxido de carbono por año basado en los datos de CO₂ / kWh. En este caso para 60 unidades, la reducción estimada es 1,2 toneladas métricas, equivalente a las emisiones anuales de 15 vehículos livianos.

2.1.2 COCA COLA VIENNA (caso de éxito)

El estudio realizado en Vienna consistió en la medición de consumo de potencia activa antes y después de la instalación de la tecnología Movigear.

La medición de consumo se realizó en 2 ubicaciones diferentes a través de toda la línea de transporte de botellas y se extrapolaron sus resultados a las 39 unidades restantes.

Resultados antes del reemplazo:

- Periodo de medición: 5 días, 21 horas
- Demanda de potencia activa promedio: 18,18 kW
- Consumo energético: 2 567 kWh

Resultados después del reemplazo:

- Periodo de medición: 5 días, 21 horas
- Demanda de potencia activa promedio: 4,37 kW
- Consumo energético: 617 kWh

El estudio concluye confirmando una reducción de consumo de energía de 76% medida por la empresa Wien Energie.

2.1.3 Cervecería Tsingtao, China (caso de éxito)

Este caso de estudio toma como referencia una posición significativa en la línea de transporte de botellas de cerveza donde en promedio pasan 36 000 botellas por hora.

Características de la unidad actual:

- Motorreductor convencional: Modelo SA67ADFT90L4 / Potencia nominal 2 HP / 50hz / 4 polos / Alimentación 400V / Reducción de velocidad 65,63:1 / Par nominal 160 Nm / Accionamiento por Variador de frecuencia marca Mitsubishi / Nivel de eficiencia IE1
- Unidad Movigear: Modelo MGFTT2-DSM-DBC-B/ECR / Reducción de velocidad 25,72:1 / rango de velocidad de salida 0.04 a 77,8 rpm / Par Nominal 176 Nm / Par Máximo 475 Nm / Accionamiento por señal binaria / Nivel de eficiencia IE4
- El periodo de estimación del consumo de energía es de 8008 horas al año para el cálculo del potencial de ahorro energético.

Los resultados de reducción se presentaron como potencia activa [W] y potencia aparente [VA] promedio anual.

- Reducción de potencia activa promedio: -63 %
- Reducción de potencia aparente promedio: -74 %

De igual manera se cuantifica la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en 850 kg al año basado en datos de gramos de CO₂ por kWh en la región China.

2.2 Planteamiento del problema

En unidades del fabricante SEW Eurodrive es conocido que el trabajo al 50 % de la potencia nominal reduce la eficiencia del motor hasta en 17 %, es decir, para realizar el mismo trabajo el motor eléctrico consume más energía eléctrica. El ingeniero Jorge Álvarez realizó un estudio en 2018 en la línea de producción “hojaldre” en régimen de funcionamiento nominal, y ha revelado errores en el dimensionamiento de los moto-reductores de hasta 4 veces la potencia mecánica requerida para movilizar un transportador, al mismo tiempo que otra unidad moto-reductora en el mismo sector trabaja a potencia nominal. Este sobredimensionamiento se replica en la “línea panes” después de monitorear la información de placa de los motorreductores instalados actualmente, donde el 100 % presenta factores generales de servicio inferiores a 1.

Aproximadamente el 90% de las unidades con motor eléctrico de inducción en la cinta transportadora son de la marca SEW Eurodrive, donde se encuentran presentes motor con clases de eficiencia IE1, IE2 e IE3 como máximo según el estándar IEC 60034-30, esto quiere decir que el rango de eficiencia general de los motores estaría entre 74 % y 89,5 % según datos proporcionados por SEW Eurodrive.

Adicionalmente, los siguientes puntos por mencionar corresponden a focos de pérdidas energéticas (entre 50W y 70W por cada kW demandado, equivalente a \$42 anuales por cada kW demandado aproximadamente), hoy en día sin cuantificar por parte de la empresa de alimentos, primero el control de velocidad convencional no estandarizado e impreciso, segundo las pérdidas en dispositivos de control y cableado de potencia eléctrica, y tercero, la eficiencia general promedio de las unidades moto - reductoras antes señaladas.

La empresa de alimentos panificados cuenta con cerca 200 motorreductores convencionales (caja reductora y motor eléctrico) de diferentes fabricantes para llevar a cabo la labor de transporte en las líneas de producción de toda la planta. La mayor parte de ellos reciben la energía de un control de velocidad individual para cada motor, ya que la empresa cuenta con variaciones de los parámetros de producción para los diversos productos y recetas. El proceso productivo en cada línea se realiza en movimiento continuo automático de la banda, debido a que existen cambios de dirección del movimiento en varias etapas de la “línea panes”, es

indispensable la sincronización de la velocidad de salida de cada motorreductor, la cual se hace de forma manual unidad por unidad, ya sea parametrizada directamente en el variador de velocidad o mediante un PLC (controlador lógico programable).

A pesar de la gran cantidad de motorreductores distribuidos por toda la planta, este proyecto se limita a solamente la banda transportadora identificada como “línea panes” la cual es la más relevante a criterio de la misma empresa de panificados por ser de la de mayor capacidad de producción y de más elevado régimen de trabajo anual.

La empresa de panificados ha extendido a LABS de Costa Rica, S.A., su intención de abrir paso a oportunidades de mejora mediante reestructuración y modernización de los motorreductores y su control eléctrico. A raíz de la identificación de alternativas para incrementar la eficiencia del proceso productivo, se han generado espacios de diálogo entre los ingenieros de LABS de Costa Rica, S.A., y el departamento de proyectos y gerencias regionales de la empresa de panificados, lo cual ha resultado en la creación de la necesidad de migrar los sistemas electromotrices actuales a un nivel de eficiencia superior basado en estándares internacionales. La necesidad ha sido plasmada como una política prioritaria para las nuevas inversiones en el ámbito de sustentabilidad. La reducción del consumo energético hoy en día ha tomado un matiz categórico importante mediante el escalonamiento de la clase de eficiencia de los motorreductores en cada línea de producción de la empresa de panificados.

2.3 Justificación

Como parte de políticas corporativas de la empresa de panificados y acorde con pronunciamientos de la gerencia regional de la compañía misma, cualquier proyecto enfocado a reducir consumo energético tiene alta relevancia y merece ser evaluado. El estudio realizado en 2018 por parte del ingeniero Jorge Álvarez, colaborador de la empresa LABS de Costa Rica, S.A., donde analiza una serie de motorreductores evidencia puntos de mejora que pueden ser objeto de análisis para la integración de la tecnología mecatrónica.

Ante la alta competitividad comercial y la tendencia de la industria de alimentos por simplificar sus procesos para aumentar la productividad, se ha vuelto necesario el diseño de sistemas que ofrezcan mejor uso de la energía aparte de versatilidad ante los cambios del mercado de alimentos.

La empresa de panificados ha aceptado el desarrollo de esta propuesta por su intención de reducir cualquier foco de pérdida energética, ya sea por mejora de eficiencia, obsolescencia o por la necesidad de migración a nuevas tecnologías que optimicen el consumo energético.

Como solución al problema de disminución de eficiencia debido a bajo porcentaje de carga (aproximadamente \$102 anuales por cada kW demandado) y focos de pérdida energética (aproximadamente \$42 anuales por kW demandado) se propone el reemplazo de motorreductores convencionales de “eficiencia estándar IE1”, “alta eficiencia IE2” y “eficiencia premium IE3” por unidades mecatrónicas con eficiencia clase “super premium IE4” según estándar internacional IEC 60034-30-1/2014. Estas unidades integran tres elementos, caja reductora, motor eléctrico con estator de magnetismo permanente y la opción de variador de frecuencia incorporado en un solo dispositivo. Son controladas por medio de señales provenientes de un PLC pasando por un alimentador de potencia. Aquí es donde se presenta la oportunidad de implementar el control descentralizado que le da al subsistema la capacidad de modularse para la carga física demandada cuando se está en presencia de cargas variables.

En un contexto organizacional, el proyecto también busca facilitar la intervención y labores del departamento de mantenimiento realizadas en estos sistemas ya que ofrecen monitoreos y diagnósticos automáticos además de reducir el almacenaje de repuestos y otros relacionados a la instalación eléctrica de potencia y control eléctrico.

2.4 Viabilidad

La relación comercial entre la empresa de panificados y LABS de Costa Rica, S.A., se extiende por muchos años y ha hecho que se deposite una confianza en la marca SEW, lo cual facilita la intención de proponer y analizar la implementación de esta nueva tecnología. El antecedente de integración en industrias similares con cintas transportadoras horizontales marca un punto para el *benchmarking* y dicha empresa reúne todas las características de infraestructura física y de organización para evaluar y proyectar la adquisición de estos sistemas mecatrónicos.

Otro aspecto positivo es que se cuenta con amplio material técnico por parte del fabricante para respaldar selecciones de equipos de manera confiable; además, se cuenta con soporte continuo del departamento de ingeniería y aplicación de SEW Eurodrive quienes pueden atender consultas del diseño en un corto tiempo.

Desde el aspecto legal, LABS de Costa Rica, S.A., cumple con todas las responsabilidades jurídicas y laborales que respaldan la ejecución de proyectos a nivel nacional e internacional. Este cumplimiento se extiende también al fabricante del equipo quienes aseguran la conformidad de los equipos al incluir toda documentación de relevancia, como operación, instalación y advertencias de seguridad.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo General:

Comprobar la factibilidad de la reconversión tecnológica de los motores eléctricos y su control de velocidad en las bandas transportadoras como alternativa de ahorro de energía eléctrica.

2.5.2 Objetivos Específicos:

- Analizar el diagnóstico del uso y consumo energético electromotriz actual de las cintas transportadoras de productos panificados llamada “línea panes”.
- Diseñar la alternativa del control descentralizado de varias unidades moto-reductoras mecatrónicas Movigear® acorde a los requerimientos de productivos de la empresa de panificados.
- Validar la conversión técnica y energética de la operación actual con control centralizado de velocidad al escenario teórico de control descentralizado de unidades mecatrónicas moduladas.
- Evaluar el proyecto de inversión de la reconversión de la tecnología de los motorreductores de la banda transportadora de “línea panes” en un periodo de 10 años.

2.6 Metodología

La metodología de desarrollo de este proyecto consiste en el análisis por etapas de forma cuantitativa y cualitativa, limitado a un sector de alta relevancia para la empresa de alimentos con el fin de mantener la integridad de la necesidad o problema planteado. A continuación, se muestra un esquema de las etapas a seguir para el cumplimiento de los objetivos.

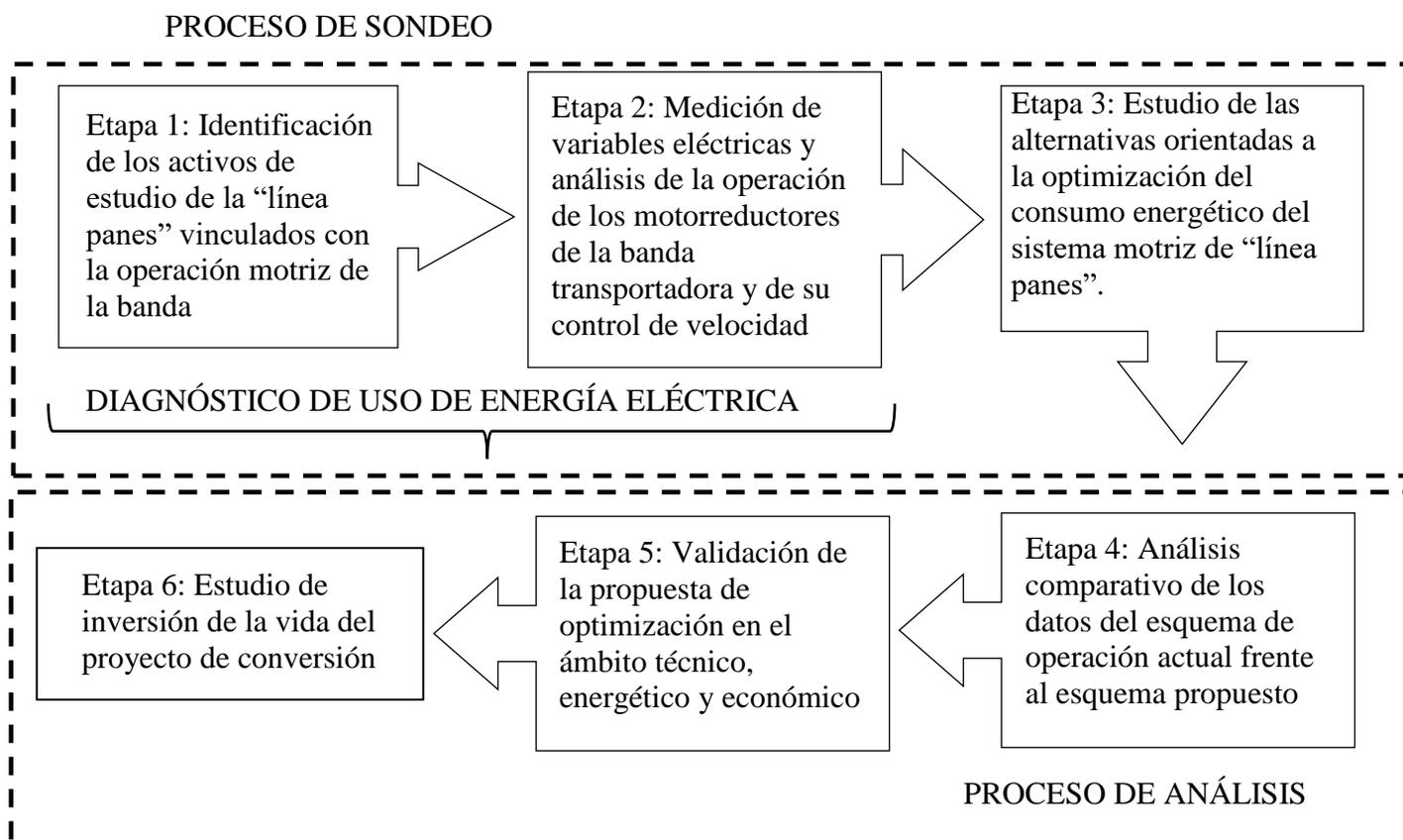


Figura 2.1. Metodología de desarrollo del proyecto.

Fuente: Elaboración propia. MS Office Word.

2.7 Alcance

El proyecto permitirá diagnosticar la condición actual de consumo de electricidad del sistema electromotriz en la cinta transportadora de “línea panes” además de verificar el estado de los medios de suministro de energía (paneles de control, PLC, cableado de potencia y señales, entre otros).

Una vez realizado el reconocimiento y diagnóstico de los activos en estudio, se espera proponer un rediseño que optimice el consumo energético en bandas transportadoras haciendo uso de tecnología mecatrónica y control distribuido o descentralizado en la línea de panes la cual cuenta actualmente con cerca de 57 unidades moto-reductoras. Esto incluye la creación o modificación de diagramas de distribución de equipos de las áreas de interés y la nueva topología de las unidades propuestas.

El rediseño basado en control descentralizado contempla una migración del control convencional donde los elementos de accionamiento y protección se encuentran colocados en un solo panel de control. La figura 2.2 muestra un ejemplo de la diferencia entre ambos tipos de diagrama para una misma instalación de transportadores.

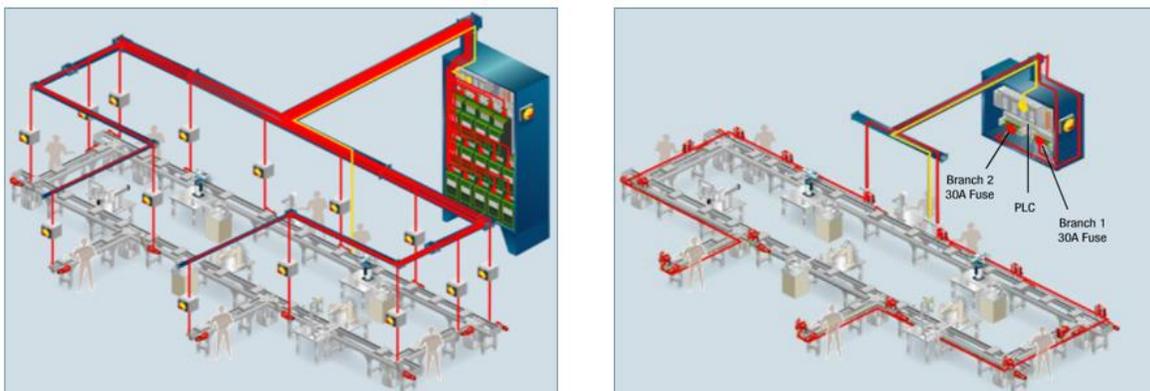


Figura 2.2. Diagrama de instalación para control centralizado (izquierda) y descentralizado (derecha)

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

Por definición el concepto centralizado ubica la electrónica para la regulación de las máquinas individuales y los sistemas generales en un panel de conexiones con su respectivo PLC encargado del control global. En contraparte, el concepto descentralizado o distribuido

apuesta por la idea modular de componentes estandarizados y sus funciones, con la electrónica acoplada en el sistema de accionamiento.

Una vez que se ha seleccionado una alternativa conveniente para los propósitos de la empresa de alimentos y viable por parte de LABS de Costa Rica, S.A., como proveedor, se diseña un plan de implementación del proyecto por etapas con la finalidad que plantear el camino a seguir durante la conversión tecnológica.

Por último, se realizará un estudio de inversión económica con el fin de valorar el beneficio económico del proyecto para la empresa de alimentos.

CAPÍTULO 3 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Potencia eléctrica

Si un voltaje inducido causa un flujo de corriente en la misma dirección del voltaje inducción, entonces existe una potencia eléctrica generada, proporcional al voltaje inducido por la corriente. Esta potencia podrá ser consumida por una carga, como por ejemplo un motor eléctrico. Si el voltaje externo causa un flujo de corriente en su dirección, opuesto al voltaje inducido, entonces la potencia eléctrica fluirá en las bobinas, proporcional al voltaje externo por la corriente. Este efecto podrá causar una fuerza electromagnética que deriva en movimiento mecánico de un elemento motriz. La potencia eléctrica se define como la capacidad de generar trabajo en un tiempo determinado y se mide en watts (W).

Para sistemas eléctricos, la potencia disipada por una carga se denomina potencia activa o real. La potencia real está simbolizada por la letra P. La potencia dedicada a la magnetización y devuelta en carga debido a sus propiedades magnetomotrices se conoce como potencia reactiva. La potencia reactiva está simbolizada por la letra Q y se mide en la unidad de Volt-Amperes-Reactivo (VAR). La potencia total en un circuito de CA, tanto disipada como absorbida / devuelta, se denomina potencia aparente. La potencia aparente está simbolizada por la letra S y se mide en la unidad de Volt-Amperes (VA).

Estos tres tipos de potencia están relacionados trigonométricamente entre sí. En un triángulo rectángulo, P = longitud adyacente, Q = longitud opuesta y S = longitud de hipotenusa. El ángulo opuesto es igual a la magnitud del ángulo de fase de impedancia equivalente (Z) del circuito del elemento eléctrico.

3.2 Eficiencia energética (EE)

La eficiencia constituye el principal indicador de uso de la energía que posee una máquina eléctrica durante su operación. En los motores de inducción del tipo asíncronos, las pérdidas surgen inevitablemente en la conversión electromecánica y se transforman en otra forma de energía como calor con carácter irreversible. Básicamente se separan en pérdidas eléctricas, magnéticas, mecánicas y pérdidas adicionales. La reducción de pérdidas se logra básicamente

utilizando materiales de alta calidad y optimizando su diseño ya sea de la propia máquina o en la aplicación, como por ejemplo selección adecuada para cada uso específico.

La eficiencia energética es definida como el volumen de energía consumida por unidad producida. Principalmente se define como la relación entre la energía de entrada y la de salida. En otras palabras, la EE es la relación entre producción y consumo energético.

$$e(\%) = \frac{E \text{ salida}}{E \text{ entrada}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

En motores eléctricos de baja tensión trifásicos se han creado diferentes estándares de fabricación para categorizar sus niveles de eficiencia energética. Se pueden nombrar las principales asociaciones que crean los estándares de fabricación como NEMA (National Electrical Manufactures Asociation) y IEC (International Electrotechnical Comission).

NEMA clasifica los motores en tres clases de eficiencia, estándar, “energy efficient” y “premium”, dependiendo de la potencia eléctrica y tamaño de carcasa, donde se cada categoría debe cumplir un porcentaje mínimo de eficiencia.

IEC hace la clasificación en 5 categorías establecidas en el estándar IEC60034-30-1 denominadas IE (International Efficiency); IE1, IE2, IE3, IE4 y IE5 (en borrador, -20 % consumo respecto categoría IE4). De igual manera al estándar NEMA, los motores se categorizan por el porcentaje de eficiencia eléctrica a cierta potencia nominal.

3.3 Ahorro energético

El ahorro energético es el desarrollo y diseño de propuestas de mejora y optimización del consumo de recursos energéticos para producir un bien. En sistemas de motores y sus medios de control se logra realizando cambios que mejoren la eficiencia global del sistema en cualquiera de los puntos de alimentación de energía, el ahorro logrado basado en eficiencia se calcula así:

$$\text{Ahorro energético } (\%): 1 - \frac{\text{eficiencia global anterior}}{\text{eficiencia global nueva}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

El valor obtenido de la fórmula anterior sirve para evaluar de forma cuantitativa y teórica la optimización de los elementos presentes en un sistema de consumo energético en las mismas condiciones de operación.

El ahorro energético es una medida fundamental para mantener el crecimiento saludable de las empresas a través de instalaciones más eficientes.

3.4 Torsión rotacional de un motor eléctrico

La fuerza motriz de un motor eléctrico es el torque el cual corresponde al par que hace funcionar el motor y está activo de 0 % a 100 % de velocidad de operación. La potencia producida por el motor depende de la velocidad del motor. Para un motor eléctrico se calcula de la siguiente manera con la potencia mecánica en el eje de salida medida en W, torque en unidades Nm y velocidad angular en revoluciones por minuto (rpm).

$$P [W] = \frac{T[Nm]*n [rpm]}{9,549} \quad (\text{Ecuación 3})$$

3.5 Métodos para la determinación de la eficiencia de motores eléctricos asíncronos de inducción

Las principales normas para la determinación de la eficiencia de operación de máquinas asíncronas están definidas en tres regiones: Europa, América y Asia. Las normas de referencia fundamentales son IEEE-112, IEC 34-2 y JEC-37. Cada una establece metodologías de aplicación como se menciona a continuación, considerando pérdidas, tipos de mediciones o instrumentos, valores de corrección de temperatura para las resistencias y otros:

- **IEC34-2:** Elaborada por “International Electrotechnical Commission”, consiste en el uso de un método indirecto de la determinación de las pérdidas totales y con ellas estimar la eficiencia. Básicamente hace una segregación y sumatoria de las pérdidas agregando un porcentaje de pérdidas adicionales relativas a la potencia de entrada.
- **JEC-37:** Norma desarrollada por “Japanese Electrotechnical Committee”. Esta norma se caracteriza por despreciar las pérdidas adicionales.

- **IEEE-112 2004:** Elaborada por “Institute of Electric and Electronics Engineers”. Es la norma que aplica mayores exigencias y establece cinco métodos en conjunto con normas locales NEMA MG1 y CS-390 aplicadas en EEUU y Canadá.

El método A mide directamente la entrada y salida del motor y es recomendado para máquinas con potencias menores a 1 kW.

El método B utiliza potencias de entrada y salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de pérdidas adicionales. Es recomendada para máquinas con potencia menor a 180 kW.

El método C requiere de máquinas duplicadas acopladas entre sí, pero conectadas en fuentes independientes de alimentación. Una de las fuentes posee frecuencia ajustable por lo que una de las máquinas trabajaría en régimen generador y otro como motor. Aquí se segregan las pérdidas para ambas unidades y las pérdidas adicionales son divididas entre ambos proporcionalmente con la corriente en el rotor.

Los métodos D y E calculan la eficiencia con la medición de la potencia de entrada con segregación de pérdidas y haciendo uso del circuito equivalente de la máquina asumiendo las pérdidas adicionales como un porcentaje de la potencia nominal.

3.6 Métodos para la determinación de la eficiencia en condiciones de campo de motores eléctricos asíncronos de inducción

Las normas anteriores presentan complicaciones a la hora de aplicación industrial debido a que son altamente invasivos y requieren desmontaje de las unidades para ser probados en bancos de prueba con equipos de medición de alto costo y exigen personal altamente capacitado para realizar las pruebas, por lo que surge la necesidad de establecer métodos que permitan determinar la eficiencia de los motores en condiciones de operación en campo. Se han constituido métodos no estandarizados que evitan la invasión del servicio del motor haciendo uso de los datos de placa y medidas de parámetros de operación como velocidad de eje, tensión y corriente eléctrica.

- a) Método de deslizamiento compensado con tensión: este método supone que el factor de carga es proporcional a la relación del deslizamiento medido y el deslizamiento nominal. La velocidad se puede determinar utilizando un tacómetro óptico. Para

condiciones de desbalance de tensión el deslizamiento es diferente a las condiciones nominales de tensión. Para este caso no es recomendable su aplicación por generar errores muy elevados.

- b) Método de la corriente, compensado con tensión: este método propone que el factor de carga es proporcional a la relación de la corriente medida y la corriente nominal. Su aplicación es sugerida en condiciones de carga mayores al 50 % y que el porcentaje de desbalance de tensión no supere el 1 %.
- c) Método del momento de rotación de eje: la medición de potencia en el eje de salida es la forma más directa de evaluar la eficiencia. Sin embargo, es altamente invasivo y requiere de desmontaje de la unidad además de sensores de par, condiciones de alineamiento y precisión de ajuste para los equipos de medición.
- d) Método del circuito equivalente: este método se basa en la solución del modelo del circuito equivalente de la máquina asincrónica. Presenta la ventaja de determinar los parámetros de operación en diferentes estados de carga. Para tal solución es necesario realizar pruebas en vacío y de rotor bloqueado, por lo que es un método altamente invasivo y poco factible a nivel industrial.

La importancia de la determinación del factor de carga radica en la relación carga-eficiencia de las máquinas asincrónicas, ya que la mayoría están diseñadas para trabajar entre un 50% y 100% alcanzando su máximo nivel de eficiencia en rangos entre 75 y 100 % de carga. Motores sub - cargados (bajo 50 %) presentan eficiencias muy bajas y altas pérdidas dependiendo de la capacidad de potencia de la máquina y de la calidad de fabricación. El mismo comportamiento se observa en el factor de potencia.

La figura 3.1 muestra las curvas características en función del porcentaje de carga. Como se observa la curva A representa la eficiencia del motor cuando se desempeña en niveles de carga por encima o bajo 100 %. Esta curva es una representación generalizada de comportamiento; sin embargo, varía en relación con la potencia del motor.

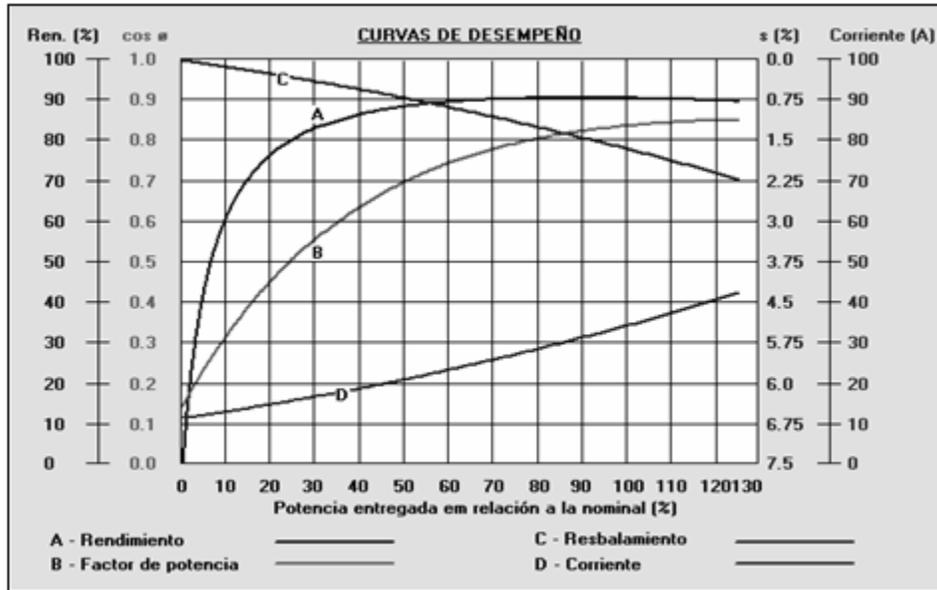


Figura 3.1. Curvas características para um motor trifásico assíncrono de 30hp de potência marca WEG.

Fuente: Viego, (2014)

Usualmente en la industria, el reemplazo de máquinas con sobredimensionamiento por otras que se aproximen a la carga demandada se realiza cuando se trata de reducir costos de capital, mejorar factor de potencia y reducir las pérdidas de energía en los alimentadores de potencia.

3.7 Motor eléctrico de reluctancia síncrona asistido por magnetismo permanente

Una alternativa interesante para las unidades de velocidad variable de alta eficiencia de hoy en día es la unidad de reluctancia síncrona asistida por magnetismo permanente, que pertenece a la familia de unidades de motor de CA síncronas sin escobillas. En el motor de reluctancia síncrona, el campo magnético del estator se produce mediante un devanado de distribución sinusoidal en un estator con ranuras y conecta el estator y el rotor a través de un pequeño espacio de aire, exactamente como en un motor CA de inducción tradicional. El campo gira a velocidad síncrona y se puede suponer que tiene una distribución sinusoidal. Básicamente, el motor de reluctancia síncrona es una máquina de campo de rotación de CA, que para todos los efectos es idéntico al de la máquina de inducción de la misma potencia nominal.

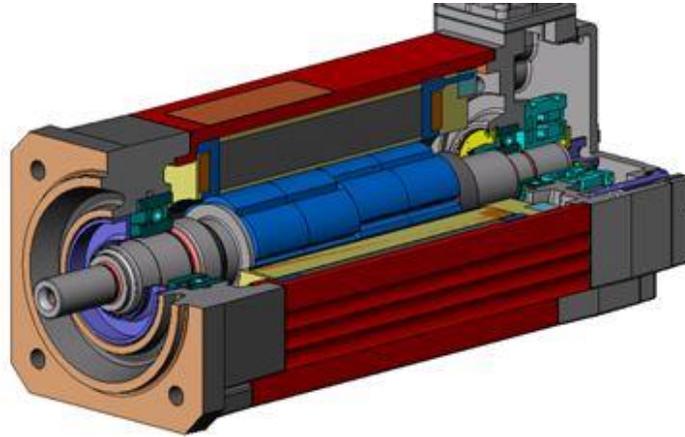


Figura 3.2. Sección de un motor de reluctancia síncrona asistido por magnetismo permanente. En azul, los imanes permanentes incrustados en el rotor del motor eléctrico.

Fuente: SEW Eurodrive (2012)

Al introducir magnetos permanentes al principio de reluctancia síncrona se obtiene una mejora de factor de potencia y reducción de pérdidas de potencia activa en el estator.

En comparación las ventajas de usar un motor de este tipo frente a uno tradicional de inducción es mejorar la posibilidad de control de velocidad, aumento de factor de potencia y mejora de eficiencia.

Otras ventajas sobre los motores convencionales de inducción son reducción de los costos de mantenimiento, mejoras térmicas, aumento de torque, menor inercia del rotor por lo que mejora el comportamiento dinámico.

3.8 Pérdidas de potencia de conductores

La cuantificación de pérdidas eléctricas en conductores de potencia es una parte importante de la estimación de cargas y consumo energético en instalaciones eléctricas.

Costa Rica ha adoptado, la norma americana NFPA 70 como Código Eléctrico Nacional (NEC) para brindar los estatutos y requerimiento de diseño de instalaciones eléctricas residenciales, comerciales e industriales donde se consume potencia eléctrica. En esta norma se establecen los parámetros para la estimación de pérdidas debido a resistencia en

conductores para distintos calibres y materiales en función de la distancia, corriente y voltaje de alimentación de la máquina o artefacto de consumo energético.

La Tabla 9 del código NEC 2014 especifica los valores de resistencia y reactancia en Ohm por kilómetro de conductores de cobre y aluminio sin revestimiento para alimentación de corriente alterna trifásica, por calibre y tipo de canalización. Para el cálculo de pérdidas se aplica la siguiente fórmula, donde la tensión V es la de alimentación de la máquina trifásica y la resistencia R es el total para la longitud del conductor calculado a partir del valor de resistencia por kilómetro provisto por NEC.

$$P\acute{e}rdidas [W] = \frac{V^2}{R} \quad (\text{Ecuaci3n 4})$$

3.9 Variador de frecuencia el3ctrica

Un tipo de unidad de frecuencia variable (VFD) o unidad de frecuencia ajustable, unidad de voltaje variable / frecuencia variable, es aquella utilizada en sistemas de accionamiento electromec3nicos para controlar la velocidad y el par de un motor de CA variando su frecuencia y el voltaje de entrada

En las aplicaciones de par variable adecuadas para el control del variador de voltios por Hertz (V/Hz), las caracter3sticas del motor de CA pueden requerir que la magnitud de voltaje de la salida del inversor al motor se ajuste para que coincida con el par de carga requerido en una relaci3n lineal de V/Hz. Por ejemplo, para motores de 460 V, 60 Hz, esta relaci3n lineal V/Hz es $460/60 = 7.67 \text{ V / Hz}$. Si bien es adecuado para aplicaciones de amplio rango, el control V/Hz es insuficiente en aplicaciones de alto rendimiento que involucran baja velocidad, regulaci3n din3mica de la velocidad, posicionamiento e inversi3n de los requisitos de carga. Algunas unidades de control V/Hz tambi3n pueden funcionar en modo cuadr3tico V/Hz y com3nmente se conocen como control escalar de velocidad.

Algunos VFD tienen la capacidad de autoparametrizar los valores de dise1o del motor que controlan, este es un proceso mediante el cual un variador mide la impedancia de un motor para el prop3sito de ajustar el algoritmo de control. El valor medido puede coincidir con la impedancia conocida para un tama1o de motor dado y usarse para determinar las relaciones

de voltaje y corriente a diferentes velocidades. En última instancia, esto permite una conducción más efectiva de la carga del motor, así como una mejor regulación de la velocidad, específicamente cuando se opera sin retroalimentación. Este procedimiento de lectura, para motores de reluctancia sincrónica asistida por magnetismo permanente o los motores asíncronos asistidos por magnetismo permanente, se realiza en modalidades estáticas y dinámicas para un control más preciso en aplicación de torque variable.

3.10 Redes y comunicación de señales

3.10.1 Señal

Una señal puede ser un flujo de información emitido por una fuente de la forma acústica, óptica, mecánica, eléctrica o magnética. Esta información se transforma en otro tipo de lenguaje para poder ser procesado por un controlador lógico.

3.10.2 Señal Digital

Corresponde a un estado eléctrico con dos niveles diferentes que se alternan en el tiempo, transmitiendo información. Cada nivel representa uno de los 2 posibles estados: 0 ó 1 lógico, Verdadero o Falso.

Los niveles específicos dependen del dispositivo fuente, pues esta información ya codificada, puede representarse como impulsos eléctricos de alta y baja tensión, en interruptores abiertos o cerrados, en datos numéricos.

La información está compuesta por un bit o un grupo de bits. Cada uno de estos datos con su comportamiento lógico hace que en cada serie de bits contenga una configuración específica equivalente a una información específica u orden.

Una importante característica que posee la señal digital es que ofrece mayores facilidades a la hora de transmitir gran cantidad de información en el tiempo y en amplios rangos de velocidad de transmisión.

3.10.3 Dirección IP

La dirección IP se define como un número que identifica un equipo específico dentro de una red interconectada. Puede ser modificado, pero no puede ser igual al otro dispositivo dentro de la misma red.

Se puede ajustar como una dirección estática (asignada por el diseñador de la red) o una dirección dinámica. Una configuración dinámica permite que la red le asigne una dirección al dispositivo y se asegura que no sea igual a la dirección de otro equipo.

La designación de la dirección usualmente se conforma por cuatro bloques numéricos enteros, dentro de los cuales se cuenta con una máscara de red, destinada a indicar si cada bloque representa la red o representa un direccionador-distribuidor aparte para una subsección del sistema.

3.10.4 EtherNet

EtherNet es un protocolo de comunicación local de una serie de equipos. Este tipo de comunicación posee tarjetas de reconocimiento de redes que permite transmitir información específica a cada máquina en la red.

EtherNet como protocolo es considerado CSMA/CD ("Carrier Sense Multiple Access Collision Detect"), lo cual significa que por su conductor solo puede transmitirse una sola señal a un punto determinado en el tiempo, esto es, si un cable conecta varias unidades, solamente permite comunicar una a la vez, las demás deben esperar a que finalice la transmisión individual.

También es permitido utilizar "Transmisión a todas las terminales", esto significa que cuando un equipo envía o recibe información, todos los dispositivos que estén en la red recibirán la misma orden, pero únicamente el dispositivo con la dirección MAC especificada, acepta los datos, mientras que las restantes los ignoran.

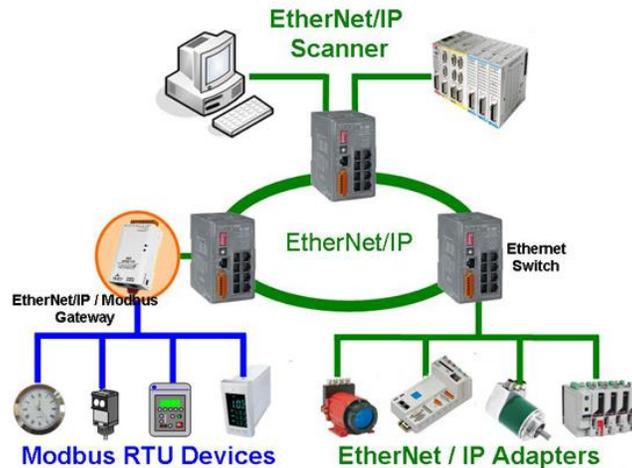


Figura 3.3. Representación de una red de comunicación EtherNet y su jerarquía de operación de elementos.

Fuente: <http://www.icpdas.com>

El protocolo EtherNet está estandarizado en la normativa IEEE 802.3 (Ethernet) y 802.11 (Wireless LAN).

EtherNet está principalmente orientado para automatización de oficinas, procesamiento de datos distribuido y acceso de terminales que requieran de una conexión de bajo costo a un medio de comunicación local transmitiendo datos a altas velocidades.

Algunas de las principales ventajas que poseen las redes EtherNet son:

- Puesta en marcha ágil debido a su facilidad de conexión.
- Permite ampliaciones.
- Interconexión de las áreas más diversas, como administrativas (computacionales) y manufactura.
- Comunicación a gran escala por la posibilidad de integración por WAN (Wide Area Network).
- Aseguramiento de la inversión por la posibilidad de optimización y perfeccionamiento.

3.11 Movigear

Los equipos de la gama Movigear consisten en motorreductores que integran en un solo armazón la caja reductora de engranajes paralelos, un motor eléctrico trifásico de magnetismo permanente y el variador de frecuencia. Su construcción general es como se puede observar en la siguiente figura.

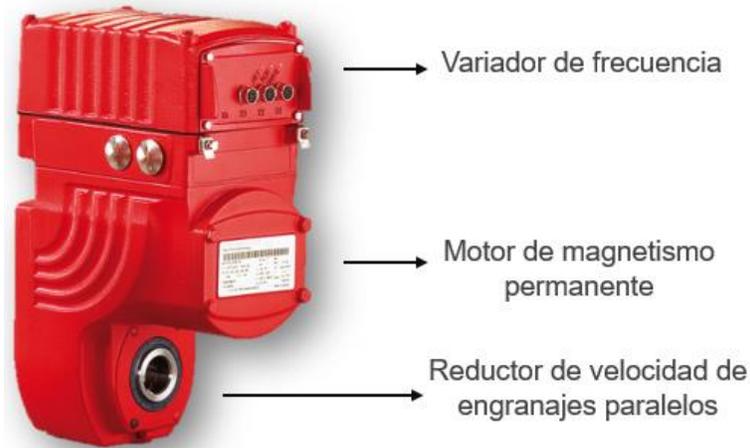


Figura 3.4. Estructura general de un motorreductor gama Movigear®.

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

Algunas características generales se mencionan a continuación:

- Rango de velocidad variable 10:1
- Rango de velocidad extendido 2000:1
- Alimentación interna de 24Vac
- Safe Torque Off (STO): capacidad de bloqueo de seguridad para mantenimiento
- Frenado no mecánico
- Encoder interno en motor
- Protección ambiental IP65 mínimo y posibilidad para uso en áreas de alta exigencia higiénica.
- Posición de montaje universal
- Capacidad de interconexión en cadena
- Cableado apantallado

- Alta capacidad de valores de sobrecarga (hasta 350% del torque nominal por 5 segundos)
- Diseño relativamente compacto
- Temperatura ambiente hasta 40°C (máximo a 60°C pero disminuye capacidad de torque)
- Múltiples tamaños de eje hueco con cuña o tipo TorqLOC (eje hueco liso con anillo de contracción)
- Lubricación sintética
- Resistencia de frenado interna incorporada para control tipo “4-quadrant”

Algunas ventajas de la implementación:

- Diseño compacto: reductor, motor y electrónica en un solo sistema mecatrónico
- Simplifica la planificación y diseño de sistemas
- La reducción del número de variantes permite el desarrollo y diseño de sistemas de manejo de productos con piezas prefabricadas o modulares
- Reducción en el almacenaje de repuestos por el tipo de variante
- Protección al ambiente elevada y superficies higiénicas para industria alimentaria y de salud.
- Bajos niveles de ruido debido a operación sin abanico
- Reducción de consumo energético por alta eficiencia de componentes

La gama Movigear® se categoriza en dos ámbitos, por el modo de control o instalación y clasificación de torque, los cuales son definidos por aplicación proyectada. Posterior a la determinación del equipo idóneo para satisfacer la necesidad de la aplicación, se procede al dimensionamiento de variables y selección de características que se ajusten a los requerimientos del proceso donde es utilizado.

Clasificación por torque:

- Movigear MGF 1: torque nominal igual a 100 Nm
- Movigear MGF 2: torque nominal igual a 200 Nm
- Movigear MGF 4: torque nominal igual a 400 Nm
- Movigear MGF 4/XT: torque nominal igual a 400 Nm (mayor torque en operación continua)

Clasificación por modo de control e instalación:

- DBC: Direct Binary Communication (Comunicación directa binaria)
- DAC: Direct AS-Interfase Communication (Comunicación directa por AS-Interfase)
- DSC: Direct SBus Communication (Comunicación directa por Sbus)
- SNI: Single Line Network Installation (Instalación de red de línea única)

Para cada modo control es posible citar las características típicas y ejemplos de aplicaciones como se muestra en la tabla 3.1 y figura 3.5.

Tabla 3.1. Características principales de los modos de control e instalación para la gama Movigear®

Modo de control e instalación	Características principales y aplicaciones
DBC	<ul style="list-style-type: none"> - Puesta en marcha simple vía interruptores DIP y potenciómetro - Velocidades y rampas de aceleración parametrizables - Control vía señales binarias o de “relay” provenientes de PLC - Modo local vía señales binarias - Posibilidad para conexión de interfase para diagnóstico y parametrización - Uso en transportadores simples, mesas rotativas, posicionamiento, agitadores y mezcladores, trituradores y prensas. - Aplicaciones simples no en red que requieran arranque suave o altos torques
DAC	<ul style="list-style-type: none"> - Conexión de comunicación simple - Velocidades y rampas de aceleración parametrizables - Conexión vía AS-interfase universal - Conexión de sensores externos en el mismo actuador - Modo local vía señales binarias - Posibilidad para conexión de interfase para diagnóstico y parametrización - Capacidad de alimentación de sensores - Aplicaciones como transportadores acumuladores, paletizado, mesas rotativas - Aplicaciones con arranque suave, operación basada en lectura de señales de sensores
SNI	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentación y comunicación a través de un solo cable, hasta 10 actuadores en total y distancia máxima de 100m entre el control principal y el actuador final - Reducción del número de componentes - Comunicación con nivel superior PLC vía Ethernet - No necesita conexiones vía “fieldbus” lo que elimina fallas ocultas en el bus de cableado - Reduce tiempos de puesta en marcha - Reducción de costo en implementación de proyectos - Aplicaciones como bandas transportadoras, paletizado, transportadores de tornillo, transporte de paquetería, transportadores de arrastre de cadena - Usado en transportadores de múltiples velocidades con arranque suave y altos torques - Facilita la implementación de proyectos con sincronización de bandas
DSC	<ul style="list-style-type: none"> - Permite hasta 16 actuadores conectados por SBus para un solo controlador de red - Interfase de sistema integrada - Comunicación de alta velocidad para ciclos cortos de operación - Permite cableado híbrido para SBus y potencia - Alto desempeño dinámico - Aplicaciones como paletizado, bandas transportadoras integradas en una sola máquina, múltiples transportadores sincronizados, aplicaciones de movimientos reversibles - Uso típico en sistemas de alta variación dinámica de velocidades con arranques suaves y alto torque

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

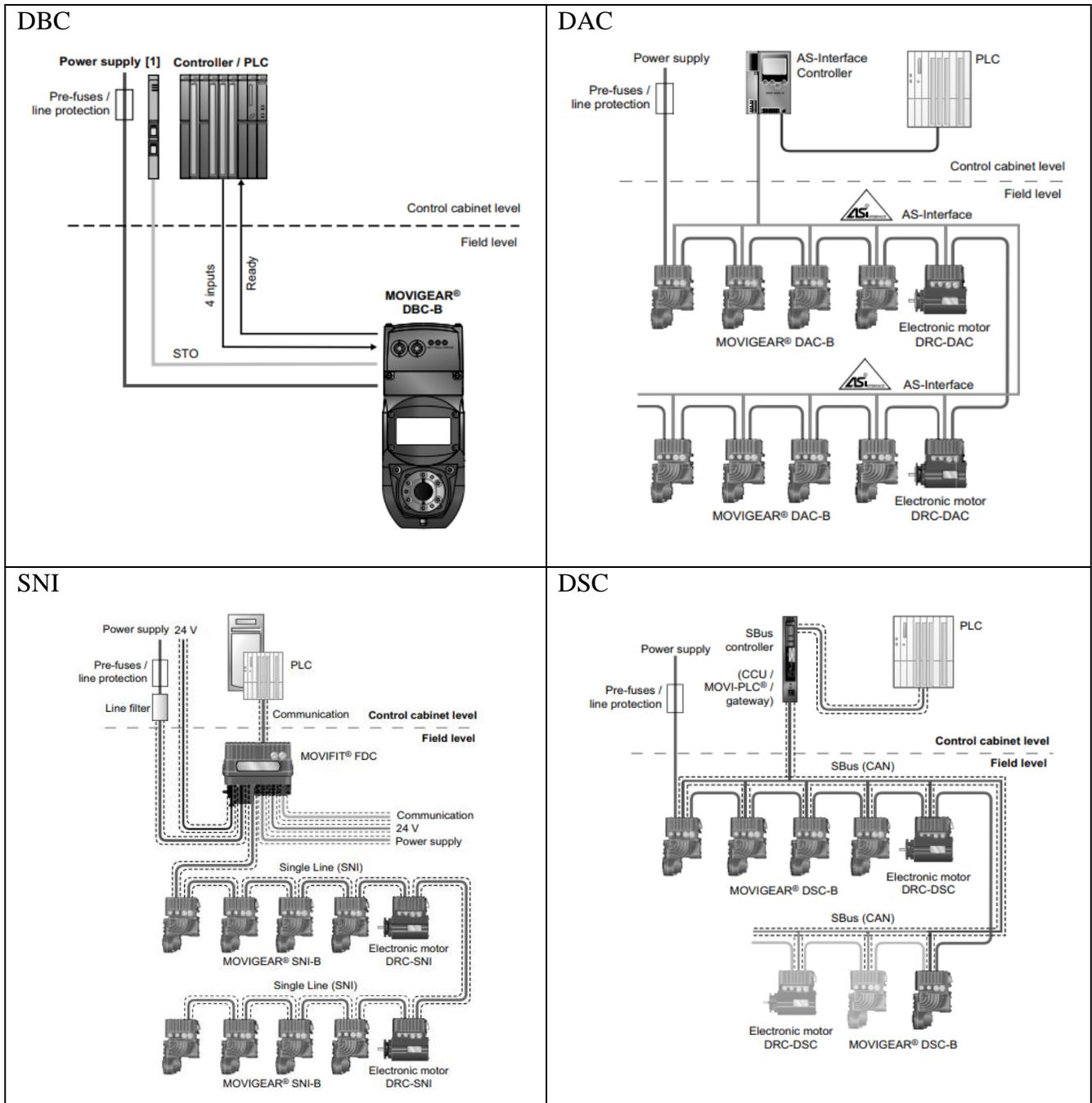


Figura 3.5. Ejemplos de topología para los modos de control e instalación.

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

CAPÍTULO 4 Diagnóstico de la instalación electromotriz

Para tener un panorama sobre el consumo energético de la “línea panes”, se realiza una identificación de las especificaciones, estado, comportamiento, consumo y parámetros de funcionamiento de las unidades motor-reductoras destinadas a movilizar las cintas transportadoras de toda la línea; los cuales son relevantes para el desarrollo y entendimiento del proyecto de reconversión tecnológica y objetivo principal de estimar la mejora en el aprovechamiento energético.

Debe reiterarse que la línea de producción por diagnosticar fue seleccionada por el criterio de importancia económica y productiva de la empresa de panificados, ya que corresponde a la de mayor exigencia operativa por la cantidad de lotes de producto requeridos para colocación en el mercado, tanto para consumo nacional como de exportación.

4.1 Especificaciones por unidad

La recolección de información se realiza en campo durante una serie de visitas con el fin de hacer lectura de las placas de especificaciones colocadas en cada cinta transportadora. El 90% de las unidades incluidas en este reconocimiento corresponden al fabricante SEW Eurodrive por lo que se facilita el acceso a características constructivas y de diseño ausentes en la placa. LABS de Costa Rica, S.A., cuenta con asistencia del área de ingeniería del fabricante gracias a su representación y distribución autorizada.



Figura 4.1. Placa típica de un motorreductor marca SEW Eurodrive.

Fuente: Elaboración propia (Tomada el 21 de mayo de 2019)



Figura 4.2. Motorreductor SEW Eurodrive ubicado en “línea panes”.

Fuente: Elaboración propia. (Tomada el 21 de mayo de 2019)

La Figura 4.1 y 4.2, muestran un ejemplo del proceso de registro llevado a cabo para un equipo motorreductor SEW Eurodrive ensamblado en EUA, del cual se puede extraer su número de serie, modelo, potencia nominal, par nominal, porcentaje de eficiencia nominal, clasificación eficiente, relación de reducción, posición de montaje, velocidad del motor, factor de servicio, tensión alimentación, corriente nominal, entre otras. Para el restante 10 % de las unidades de otros fabricantes solamente se toman datos de placa. Para efectos del diseño posterior de los reemplazos, en el estudio de la condición operativa actual, no se realizan mediciones directas de consumo energético en todas las unidades parte del grupo de motores debido a la limitante de tiempo y costo elevado de la contratación externa de un proveedor de servicios de medición, además se descartó la compra de un equipo analizador de potencia debido al alto costo adquisitivo para la empresa y la etapa de estudio de esta propuesta. El proveedor externo del servicio de análisis energético tiene como política comercial un periodo de medición de consumo energético de una semana ya sea para un panel o una máquina individual. Este estudio estaría requiriendo la medición de consumo de cada uno de los 50 motores parte del diagnóstico, lo que representa 50 semanas de medición de consumo con un costo de \$200 por semana, lo cual lo convierte en una alternativa inviable para el desarrollo de esta propuesta.

El costo adquisitivo de un equipo analizador de potencia es de alrededor 1300 dólares. La gerencia administrativa de LABS de Costa Rica, S.A., como proveedor de esta propuesta, ha considerado no invertir en tal equipo durante esta etapa de estudio.

El reconocimiento de cada una de las placas se hace listando la posición de cada cinta transportadora según el orden de la línea de producción, separado en las siguientes secciones:

- Sección 1: Transportadores de masas
- Sección 2: Transportadores entre fermentador y horno
- Sección 3: Desmoldeo
- Sección 4: Transportadores de moldes
- Sección 5: Transportadores de empaque

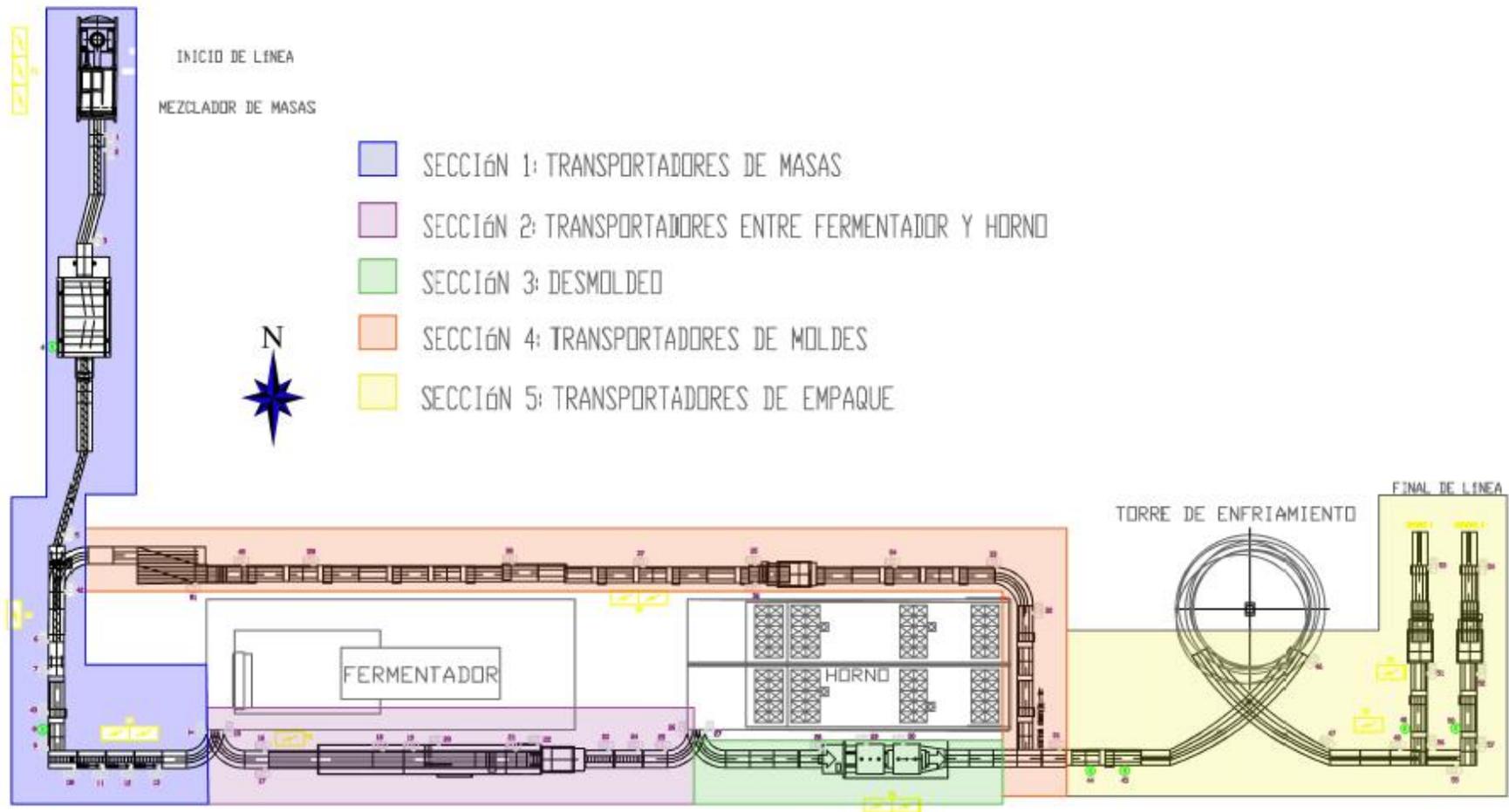


Figura 4.3. Diagrama de distribución de secciones de transportadores para línea panes.

Fuente: Elaboración propia, (AutoCAD 2016)

La siguiente tabla presenta un extracto de las unidades tomadas en cuenta para una sección de la “línea panes”. La tabla 4.1 muestra un ejemplo de la identificación de posiciones de equipos motorreductores; incluye el nombre de la posición según uso interno de la empresa pues no usan codificación por número de activo, además incluye el número de serie único de fabricación y el modelo de equipo que permite identificar parte de las especificaciones técnicas según su nomenclatura.

Tabla 4.1. Extracto de identificación de unidades en Sección 1: Transportadores de masas

UNIDAD	UBICACIÓN	SO	MODELO
1	BANDA ELEVADORA 1 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 1	80.7230327301.0001.15	SA47/T DRE80M4/DH
2	BANDA ELEVADORA 2 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 2	80.7230327301.0001.15	SA47/T DRE80M4/DH
3	BANDA ELEVADORA 3 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 3	80.7230327301.0001.15	SA47/T DRE80M4/DH
4	BANDA INCLINADA	870236957.12.12.001	KA77DRE132M4/V
5	DOUG SPACER MOTOR MTR 223	-	NORD-MARATHON
6	MOTOR BANDA SUP PRESION MODELADO MTR360	87.7383680104.0001.16	SF37 DRS71S4
7	MOTOR BANDA INF MODELADO MTR343-MAKEUP BELT MOTOR	87.7383680105.0001.16	KA37 DRN100L4
8	PAN INDEXER MTR 602 - SERVO	-	ALLEN BRADLEY
9	MOTOR BANDA CORTA	87.7359881702.0002.16	KA47/T DRS71M4
10	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 1-P01	42.4201924201.0003.11	KA37 DRE100L4
11	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 2-P02A	87.7476118201.0005.17	KA47/T DRS71M4
12	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 3-P02B	87.7476118201.0002.17	KA47/T DRS71M4
13	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 4-P03A	87.7476118201.0006.17	KA47/T DRS71M4
14	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 5-VUELTA 90 IZQ-ENT FERM	87.7476118201.0001.17	KA47/T DRS71M4
15	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 5-VUELTA 90 DER-ENT FERM	-	NORD-MARATHON

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

El registro de especificaciones se realiza de la siguiente forma como se muestra en la tabla 4.2, con el propósito de facilitar el acceso a información para efecto de cálculos posteriores, segmentación y categorización por características.

Tabla 4.2. Ejemplo de tabulación de datos específicos

UNIDAD	UBICACIÓN	SO	MODELO	POTENCIA mecánica HP	POTENCIA mecánica kW	CORRIENTE NOM @ 230VAC	CLASE EF	Factor de Potencia	EF 100%	Relación de reducción	TORQUE Ma NOM	VEL. NOM
1	BANDA ELEVADORA 1 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 1	80.7230327301.0001.15	SA47/T DRE80M4/DH	1	0.75	2.9	IE2	0.78	82.5	20.33	90.1	86

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

4.2 Condiciones operativas

El modo de operación productiva de la línea en estudio está determinado por la “receta” de pan en preparación ordenada por el departamento de producción. La tabla 4.3 muestra un listado de todas las “recetas” posibles.

Tabla 4.3. Lista de recetas producidas en "línea panes"

Receta	Descripción	Receta	Descripción
1	Blanco Espiga Dorada 450g	12	Pan 0% Grasa Integral 5
2	Pan Blanco Monarca 540g	13	Pan Light 500g
3	Pan Blanco 800g Inst. Bim.	14	Vital Semillas 600g Bim.
4	Blanco Sandwich. 800g Bim.	15	Vital Fruticereal 600g Bim.
5	Pan Blanco 560g	16	Pan Blanco Dieta 0% Grasa Two Pack
6	Pan Blanco 720g	17	Pan Blanco 0% Grasa/Azúcar
7	Pan Blanco Light 580g Bim.	18	Pan Multigrano 540g Bim.
8	Integral 800g Tul	19	Pan Artesano 535g B
9	Integral 700g Espiga Dorada	20	Pan Blanco Consumo 450g
10	Pan Blanco 550g Bred.	21	Pan Integral 530g Bim.
11	Artesano Mantequilla 500g		

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

Para las mediciones posteriores de estado de carga y velocidad angular de los motorreductores se ha tomado como referencia la “receta” número 5, Pan Blanco 560g ya que es la de mayor frecuencia de producción por lotes y cantidad de unidades producidas por hora. Esta condición de medición se encuentra en un punto intermedio aproximado de la cantidad de productos y su respectivo peso, por lo que debe ser compensado con un valor porcentual de ajuste como factor de servicio para asegurar un funcionamiento estable cuando

se encuentre a máxima carga de trabajo, la cual sería durante la producción de las “recetas” de mayor peso por unidad, “receta” 3, 4 y 8 de la tabla 4.

Para diagnosticar el estado de operación y estimar el consumo energético, las mediciones realizadas corresponden a la corriente CA demandada en pleno proceso productivo y la velocidad de salida angular en el eje de salida de cada reductor.

Los valores de corriente y velocidad son mediciones directas tomadas con un amperímetro de gancho marca Fluke y un tacómetro digital de contacto marca GBA. A partir de dichos valores se obtiene la estimación de porcentaje de carga, el cálculo de torque en eje de salida, porcentaje de eficiencia del motor al nivel de carga específico y frecuencia parametrizada en cada control de velocidad por unidad. Los valores medidos se presentan en el documento anexo *Levantamiento línea panes*.

Con esta información es posible determinar la condición operativa de referencia para la cual se dimensiona la unidad de reemplazo. El grado de seguridad para la aproximación de la eficiencia real depende del porcentaje de carga calculado, para el cuál se estima una desviación de 15 % para valores de carga por encima de 50 %, 20 % para valores entre 25 y 50 % de carga, y 25 % para valores menores a 25 %. Esta desviación se traslada directamente al cálculo de la potencia real demandada por motor y es debido a que el método de estimación de carga a partir de la corriente no toma en cuenta la variación del factor de potencia con la misma condición de carga. El cálculo de la variación del factor de potencia requiere de un nivel invasivo a la máquina no autorizado por la empresa de panificados a proveedores como LABS de Costa Rica, S.A.

4.2.1 Estimación de carga

El método de estimación de carga utilizado es el de corriente con compensación de tensión, explicado en el apartado 3.6. El método propone calcular el porcentaje relativo de corriente “I”, entregada por el variador de velocidad a razón de la corriente nominal del motor al 100 % de carga. Además, agrega un factor de compensación por desbalance de tensión entregada por el control que en este caso se asume como igual a 1 por tratarse de un control escalar V/Hz y tener longitudes de conductores relativamente cortas entre el control y motor.

$$\% \text{ de carga} = \frac{I \text{ medida}}{I \text{ nominal a } 100\% \text{ carga}} * 1 \quad (\text{Ecuación 5})$$

La siguiente tabla muestra un extracto de la estimación de carga para la sección 1: transportadores de masas. Unidades con porcentaje de carga igual a 0 indican que encuentran fuera de servicio temporalmente debido al tipo receta y para efectos de estudio de consumo se utilizan sus valores operativos a plena carga, esto no altera los resultados finales. La corriente operativa de cada unidad fue medida puntualmente en el variador de velocidad a través del parámetro de monitoreo o en la caja de terminales del motor en casos donde la alimentación es directa desde el panel hasta el motor sin variación de velocidad en el instante en que se encuentra en condición de carga de banda a plena capacidad con producto. Esta lectura puntual en modo estable de operación con carga, no es una lectura promedio de corriente resultado de una serie de datos registrados en un periodo de tiempo.

Tabla 4.4. Porcentaje de carga operacional de los motores en Sección 1

UNIDAD	UBICACIÓN	MODELO	POTENCIA mecánica HP	POTENCIA mecánica kW	CORRIENTE NOM @ 230VAC Amp	CORRIENTE OPERATIVA Amperios	PORCENTAJE CARGA
1	BANDA ELEVADORA 1 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 1	SA47/T DRE80M4/DH	1	0.75	2.9	0.8	28%
2	BANDA ELEVADORA 2 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 2	SA47/T DRE80M4/DH	1	0.75	2.9	0.82	28%
3	BANDA ELEVADORA 3 TRANSPORTADOR AEREO DE MASAS 3	SA47/T DRE80M4/DH	1	0.75	2.9	0.82	28%
5	DOUG SPACER MOTOR MTR 223	NORD-MARATHON	1	0.75	3.22	1.65	51%
6	MOTOR BANDA SUP PRESION MODELADO MTR360	SF37 DRS71S4	0.25	0.19	0.89	0.41	46%
7	MOTOR BANDA INF MODELADO MTR343-MAKEUP BELT MOTOR	KA37 DRN100L4	3	2.24	8.3	4.5	54%
8	PAN INDEXER MTR 602 - SERVO	ALLEN BRADLEY	2	1.49	4.5		0%
9	MOTOR BANDA CORTA	KA47/T DRS71M4	0.75	0.56	2.5	1.5	60%
10	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 1-P01	KA37 DRE100L4	3	2.24	8	5.15	64%
11	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 2-P02A	KA47/T DRS71M4	0.75	0.56	2.5	1.9	76%
12	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 3-P02B	KA47/T DRS71M4	0.75	0.56	2.5	1.65	66%
13	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 4-P03A	KA47/T DRS71M4	0.75	0.56	2.5	2	80%
14	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 5-VUELTA 90 IZQ-ENT FERM	KA47/T DRS71M4	0.75	0.56	2.5	1.7	68%
15	MOTOR TRANSPORTADOR MOLDES 5-VUELTA 90 DER-ENT FERM	NORD-MARATHON	1	0.75	3.22	1.5	47%

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

El cálculo del porcentaje de carga tal como se muestra en tabla 4.4 se repite para las siguientes secciones de la línea de producción siempre para la misma receta al régimen de velocidad de operación usual, es decir, no se han presentado órdenes de acelerar la producción.

4.2.2 Estimación de frecuencia eléctrica de operación

La estimación de la frecuencia eléctrica se realiza a partir de la velocidad angular real medida en el eje del reductor y haciendo uso de los datos de placa de relación de reducción mecánica y velocidad asíncrona del motor. Con estos datos es posible obtener la frecuencia parametrizada en el variador de frecuencia. Este tipo de datos son de utilidad para conocer el estado de control de cada unidad y capacidad para entregar torque. Es calculado de la siguiente forma:

$$Frecuencia\ en\ variador\ [Hz] = \frac{Vel\ Real\ [rpm]}{Vel\ Nom\ [rpm]} * frec.\ nom.\ motor\ (50\ \acute{o}\ 60\ Hz)$$

(Ecuación 6)

Tabla 4.5. Extracto de valores de velocidad real, nominal y de frecuencia parametrizada en la unidad 42.

UNIDAD	UBICACIÓN	MODELO	POTENCIA mecánica HP	Relación de reducción	TORQUE Ma NOM	TORQUE Ma CARGA	VEL NOM	VEL REAL	Frecuencia variador Hz
42	CURVA FINAL DE MOLDES	KA37DRE100L4	3	35.57	267.0	100.1	49	80	97.95

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

En la tabla 4.5 es posible observar el incremento de frecuencia sobre el valor nominal de 60 Hz. Para un control de velocidad del modo v/f esto se refleja en una disminución del torque capaz de entregar el motor eléctrico, lo que reduce su condición de carga y finalmente su eficiencia. Este estado de carga se entiende como un sobredimensionado del motor o error de selección para la aplicación.

El estudio anterior se repite para cada unidad de la “línea panes” y posibilita la identificación de opciones de mejora. La característica de sobredimensionado de equipos es importante para la comparación y validación técnica respecto el nuevo grupo de unidades propuestas para el reemplazo.



Figura 4.4. Unidad 42 ubicada en sección 4: transportadores de moldes.

Fuente: Elaboración propia. (Tomada el 21 de mayo de 2019)

4.2.3 Estimación de torque de salida nominal y operativo

Los datos de torque de salida nominal y operativo, al igual que el valor de frecuencia configurada en el variador, sirve para observar el nivel de sobredimensionamiento presente en cada unidad. Es calculado a partir del porcentaje de carga, potencia nominal mecánica y velocidad de salida en el reductor para ambas condiciones, tanto en carga nominal como operativa real. En la tabla 4.5 es posible observar el torque de salida nominal y de carga en lado reductor.

Para unidades del fabricante SEW se obtuvo el valor de torque de salida nominal extraído de las especificaciones con el respectivo número de serie de cada unidad, el cuál contempla el grado de ineficiencia de la caja reductora. Para obtener el torque demandado, se le aplica el factor de porcentaje de carga. Para los motores distintos de la marca SEW, el torque nominal y demandado se obtiene haciendo uso de la ecuación para torsión rotacional de la sección 3.9.

4.3 Estimación de demanda de potencia eléctrica

La estimación de la potencia eléctrica demandada considera el factor de porcentaje de carga y la eficiencia energética corregida con el mismo porcentaje de carga, el cual se aplica a la potencia eléctrica nominal del motor. La eficiencia energética corregida corresponde al valor real de catálogo provisto por el fabricante de los equipos para cierto porcentaje de carga. La tabla 4.6 muestra el valor de potencia eléctrica consumida para la unidad 42 para el porcentaje de carga estimado como se referencia en la sección 4.2.1.

Tabla 4.6. Resultado de estimación de potencia eléctrica demandada por la unidad 42

UNIDAD	UBICACIÓN	MODELO	TEÓRICA AL %100 CARGA		REAL AL %CARGA		PORCENTAJE CARGA	EF 100%	EF @ %CARGA
			POTENCIA mecánica kW	POTENCIA eléctrica @ %100 CARGA kW	POTENCIA mecánica DEMANDADA kW	POTENCIA ELÉCTRICA en demanda kW			
42	CURVA FINAL DE MOLDES	KA37DRE100L4	2.24	2.56	0.83	1,05	38%	87.5	79.1

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

4.4 Estimación de consumo eléctrico

Luego de estimar la potencia eléctrica demandada por unidad, se realiza la suma de los consumos de todos los motores, asumiendo que todos funcionan al mismo tiempo.

Para hacer un cálculo más cercano a la realidad operativa de la “línea de panes”, al total de consumo se le aplican factores de utilización obtenidos mediante observación en sitio del modo de activación.

- Factor por tiempo detenido: corresponde al factor en que la unidad se detiene momentáneamente debido a la lógica programada en el PLC en respuesta a señales de sensores de elementos en determinado punto del transportador y es igual a 0,5. Lo que indica que solamente opera la mitad del tiempo considerado.
- Factor de velocidad de proceso y simultaneidad: corresponde al tiempo de espera de las diferentes secciones al momento de arranque y detención de la producción de cierta receta y es igual a 0,875. Por ejemplo, la receta “Pan blanco 560”, las secciones de transportadores 3, 4, 5 inician movimiento hasta 1 hora después del arranque del proceso para una jornada de 8 horas.
- Factor de pruebas de arranque: corresponde al tiempo dedicado a pruebas de producto, configuración de velocidades de transportadores, verificación de funcionamiento de cada unidad previo al arranque general de la línea. Es igual a 0,95.

La potencia eléctrica total demandada de las unidades en estudio es de 31,84 kW. Para efectos de la comparación con el sistema propuesto con las nuevas unidades mecatrónicas este es el valor utilizado. No toma en cuenta pérdidas de potencia en cables, elementos de control y protección ni consumo del control de velocidad.

Las pérdidas de potencia en cableado son estimadas por aparte para una comparación específica entre las longitudes de cables utilizadas en la instalación y la longitud total para el nuevo sistema. Para esto se realizó una medición en sitio del canalizado desde el variador de frecuencia hasta cada motorreductor. Según datos provistos por departamentos de mantenimiento de la empresa de panificados, para todos los motores se utiliza cable AWG12 THN tanto para conducción de potencia como para aterrizado. La longitud total de cableado estimado es de 3060 metros totales considerando las 3 fases y tierra, 2295 metros corresponde a potencia y 765 metros a conexión a tierra.

Según la tabla 9 del código NEC, la resistencia para un conductor AWG de cobre sin revestimiento canalizado por tubo de acero, la resistencia ohm a neutro por kilómetro es de 6,56 ohm/km. Para cada unidad se calcula la pérdida de potencia con su respectiva corriente medida en sitio. El resultado de pérdida de potencia total en conductores para las 3 fases es de 100,18 W.

La estimación de consumo se realiza considerando un periodo de operación de 18 horas por día, 6 días a la semana y 52 semanas al año para un total de 5616 horas de operación anuales. Estos datos son provistos por el departamento de producción de la empresa de panificados.

La potencia eléctrica total demandada de las unidades en estudio es de 31,05 kW. Este es el valor utilizado para la comparación con el sistema propuesto con las nuevas unidades mecatrónicas. No toma en cuenta pérdidas de potencia en cables, elementos de control y protección ni consumo del control de velocidad.

El consumo energético considerando las pérdidas en conductores y la potencia demandada para el periodo de operación anual y aplicando los factores de utilización se calcula como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} & \textit{Consumo energético anual} \\ & = (0,100 \text{ kW} + 31,05 \text{ kW}) \times 5616 \frac{\text{horas}}{\text{año}} \times 0,5 \times 0,875 \times 0,95 = \\ & \quad 73\,780,77 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad (\text{Ecuación 7}) \end{aligned}$$

4.5 Resultados de la condición operativa actual electromotriz

Posterior a la cuantificación de las principales variables para obtener el consumo energético total aproximado de la “línea panes” en un periodo anual, se presentan los resultados segmentados y promediados para obtener una noción de la condición actual del sistema electromotriz de los transportadores. Los datos dados serán punto de comparación con el nuevo sistema propuesto más adelante.

Tabla 4.7. Valores operativos **actuales** de desempeño promedio y consumo total de las unidades en “línea panes” según su categoría de eficiencia nominal

Categoría Eficiente IEC 60034-30	Cantidad de unidades	Potencia Mecánica nominal promedio (HP)	Eficiencia promedio @100% de carga (%)	Eficiencia promedio @ porcentaje de carga real (%)	Potencia eléctrica demandada @ porcentaje de carga real (kW)	Porcentaje de carga (%)
IE1	25	0,84	74,78	71,53	11,08	60,3
IE2	12	2.16	84,66	81,55	9,78	41,9
IE3	11	2,18	87,68	85,52	9,84	51,9
Sin categoría	2	0,28	85	85	0,31	60
Total	50	-	-	-	31,05	-
Promedio general	-	1,86	80,30	77,40	-	53,6

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

De la tabla 4.7 es posible conocer la condición de operación aproximada de la “línea panes” para 50 unidades tomadas en cuenta para el estudio. Este es punto de partida para la propuesta de mejoras donde el objetivo principal para el diseño del nuevo grupo de motores es incrementar la categoría de eficiencia a IE4 e IE5, con esto vendrá un incremento de eficiencia general y la reducción de la demanda de potencia eléctrica y por lo tanto el consumo energético anual.

Haciendo mención sobre el porcentaje de carga promedio de los equipos, el valor obtenido de 53,6 % es un valor bajo ya que se recomiendan valores generales en el rango entre 60 y 80 % para conservar la eficiencia de los motores en niveles óptimos y evitar pérdidas energéticas en la máquina. Este porcentaje general de carga ligeramente menor al recomendado puede ser resultado del control de algunas unidades sobre los valores nominales de velocidad lo que causa disminución del torque entregado. Además, se debe mencionar que, por orden del departamento de mantenimiento, ciertas unidades debieron ser sobredimensionadas en la potencia del motor como solución alternativa a eventuales fallas en el eje del motor y el piñón de acople con el reductor. Esto es posible identificarlo en equipos donde el factor de servicio es menor a 1, lo que indica que el torque máximo soportado por el reductor está por debajo de la capacidad de torque del motor.

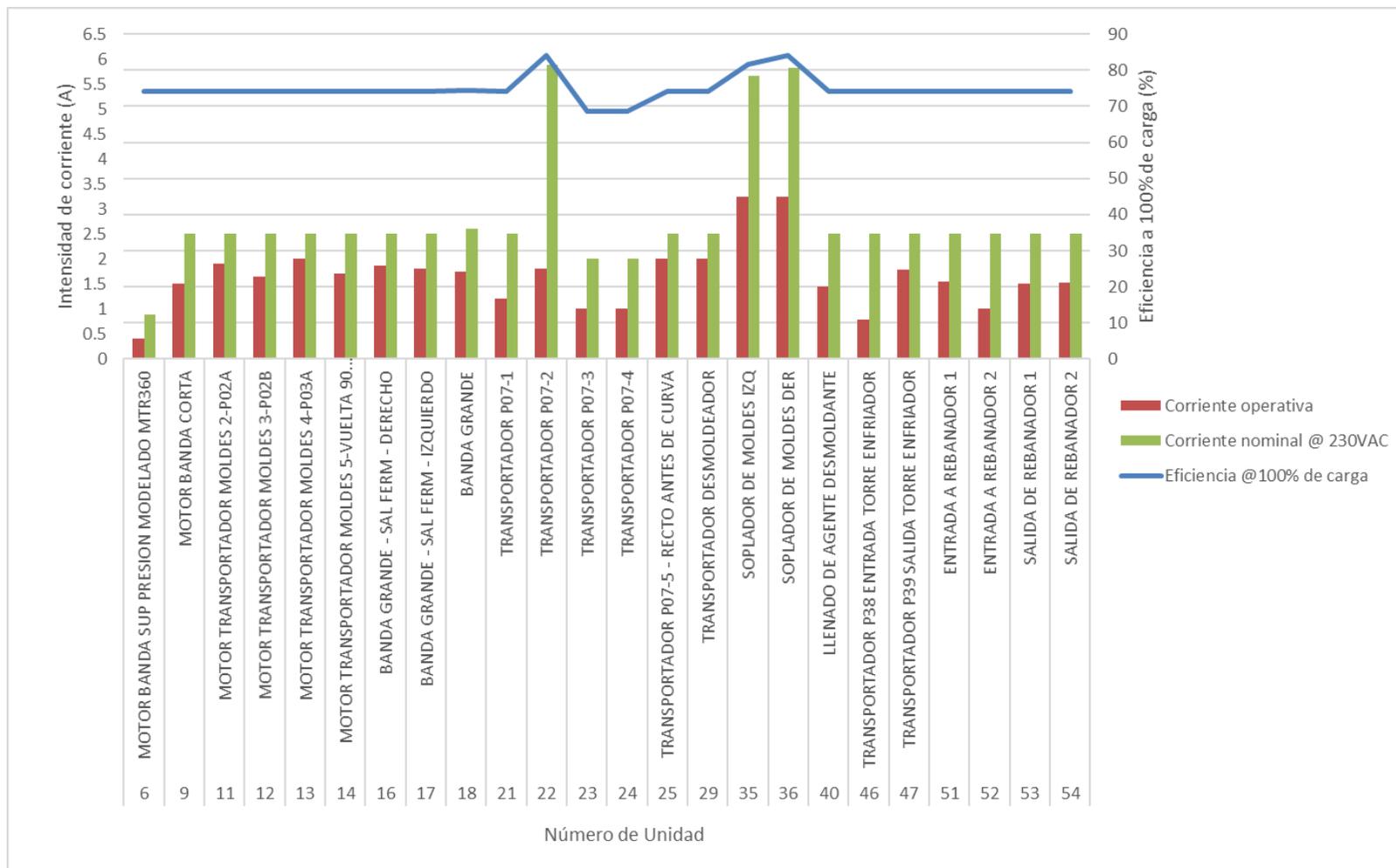


Gráfico 4.1. Valores de placa de eficiencia, intensidad de corriente nominal y operativa para las unidades de “línea panes” con categoría de eficiencia IE1.

Fuente: Elaboración propia. (MS Excel)

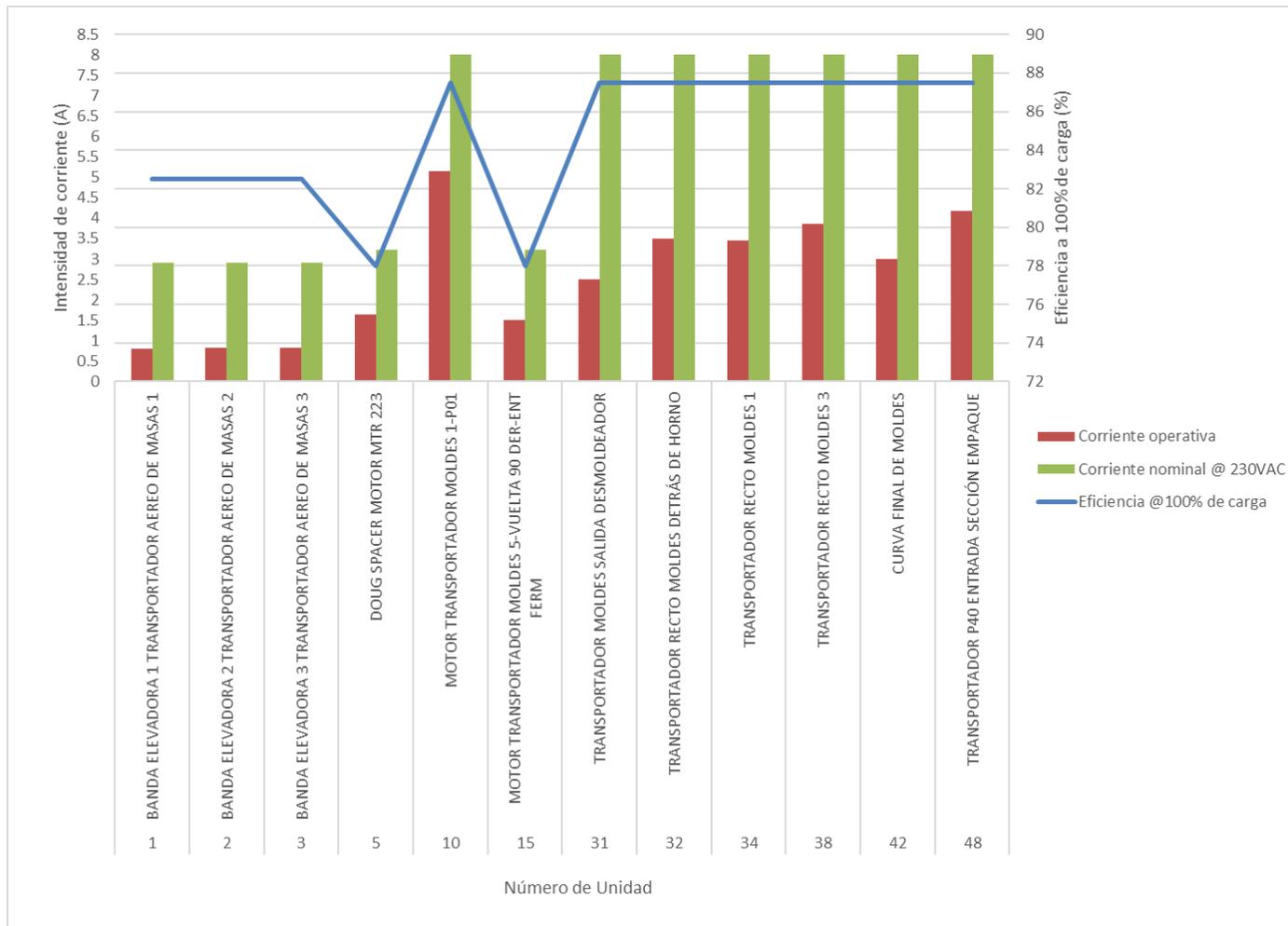


Gráfico 4.2. Valores de placa de eficiencia, intensidad de corriente nominal y operativa para las unidades de “línea panes” con categoría de eficiencia IE2.

Fuente: Elaboración propia. (MS Excel)

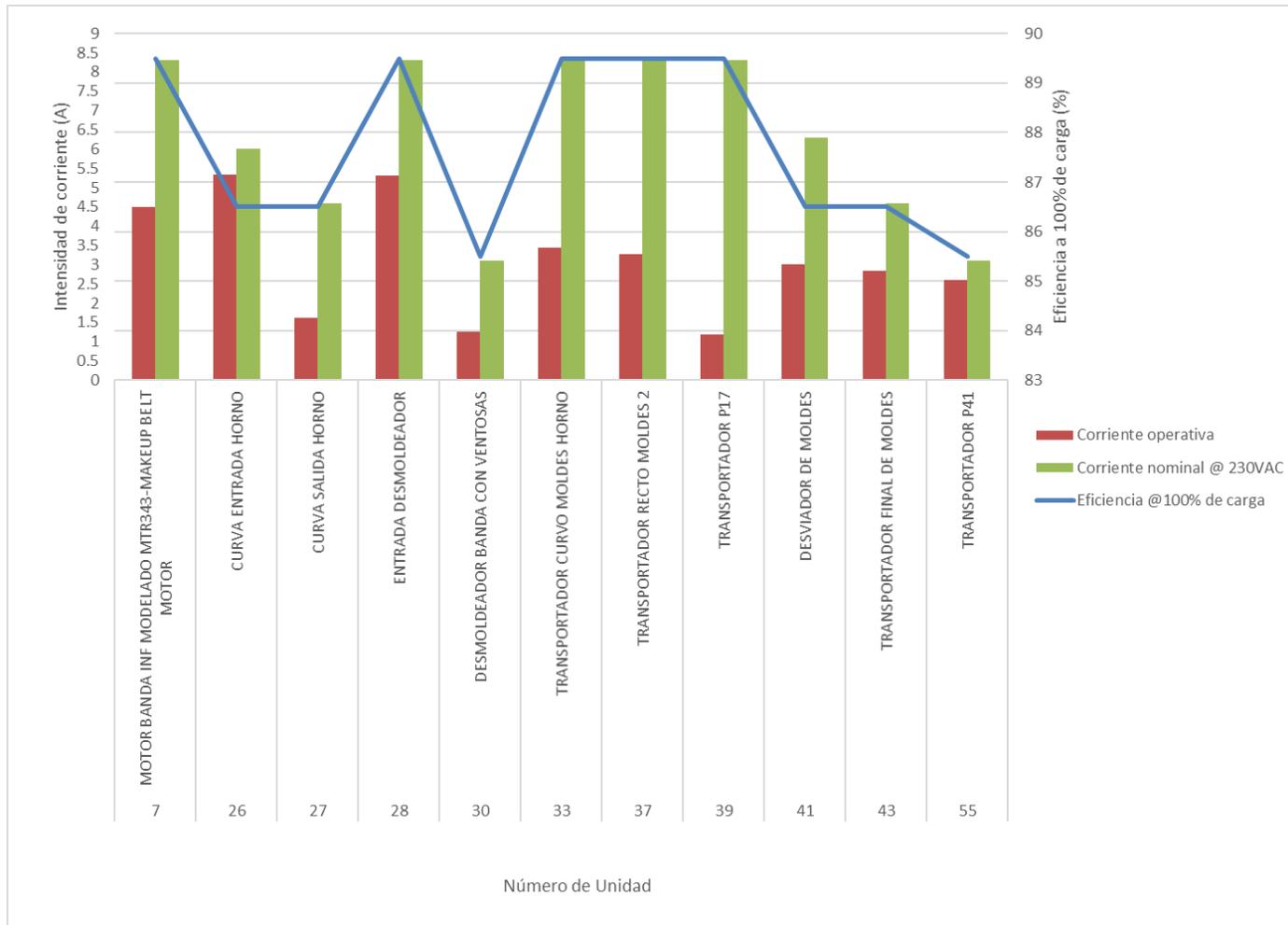


Gráfico 4.3. Valores de placa de eficiencia, intensidad de corriente nominal y operativa para las unidades de “línea panes” con categoría de eficiencia IE3.

Fuente: Elaboración propia. (MS Excel)

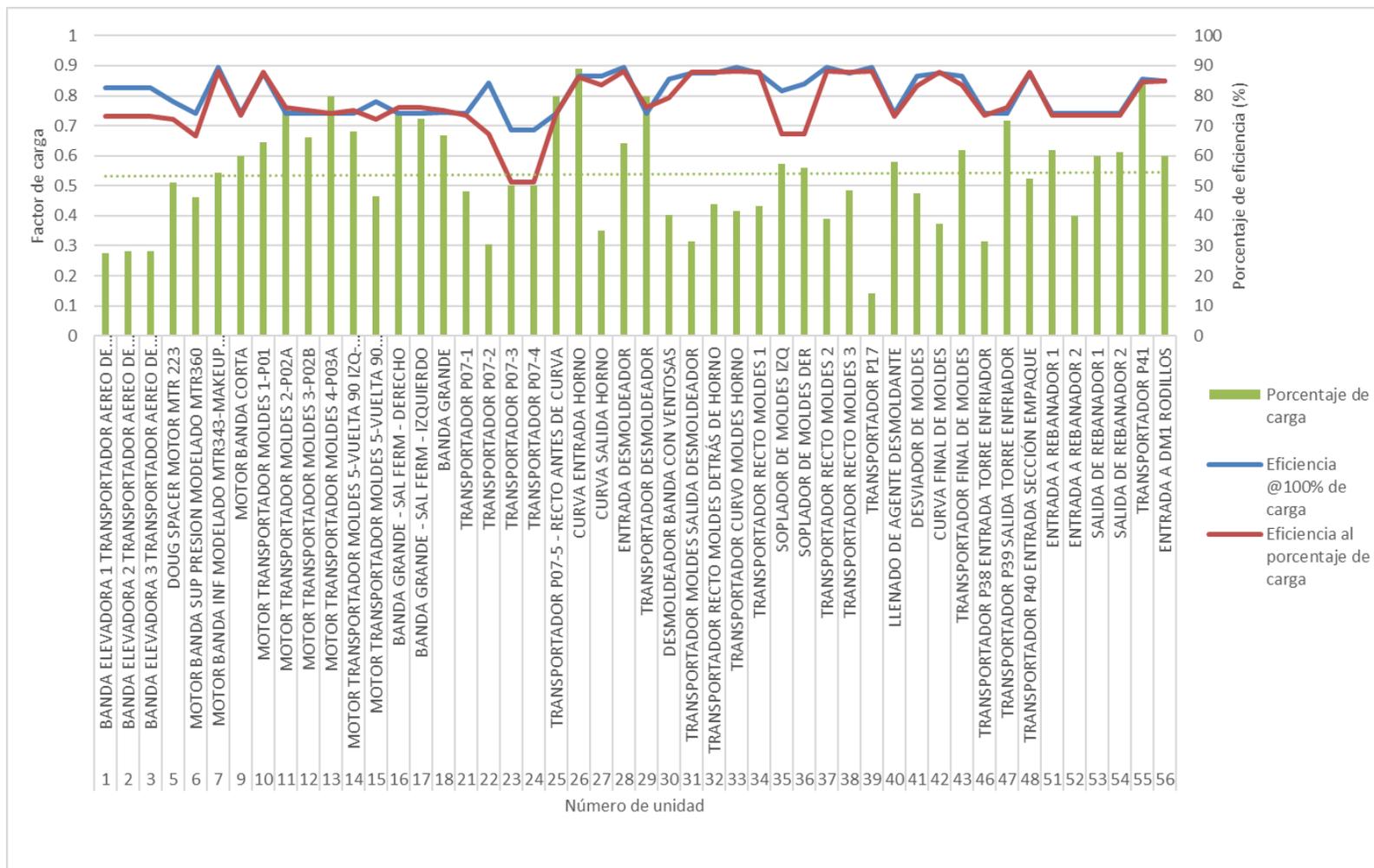


Gráfico 4.4. Tendencia de eficiencia a 100% de carga y eficiencia al porcentaje de carga estimado para la receta “Pan blanco 560 gramos” en todas las unidades de “línea panes”.

Fuente: Elaboración propia. (MS Excel)

Los gráficos 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 muestran los valores de eficiencia nominal y la comparación del nivel de corriente nominal con alimentación a 230 Vac y la corriente medida para la receta “Pan blanco 560 gramos” durante una jornada de producción estable regular. Haciendo una comparación entre la línea de tendencia de eficiencia al 100 % de carga y la eficiencia al porcentaje de carga estimado es posible notar en algunas unidades la disminución en relación al porcentaje de carga. La diferencia entre ambas líneas de tendencia se refleja en las pérdidas energéticas debidas a disminución de eficiencia.

CAPÍTULO 5 . Diseño del sistema mecatrónico sustituto

El diseño del nuevo sistema propuesto es basado en la tecnología mecatrónica registrada por el fabricante SEW Eurodrive para la gama Movigear® la cual se basa en el tipo de control distribuido donde los motorreductores poseen el control de velocidad integrado en el motor eléctrico.

5.1 Selección del modo de control e instalación

La forma de control y conexión de cada unidad se ha determinado a partir de la observación y reconocimiento del proceso y actuación de cada transportador. El listado de unidades se ha segmentado dependiendo de la función conjunta que cumple cada grupo de transportadores dentro del proceso productivo. De manera que, se ha determinado que los dos modos apropiados para la necesidad de la “línea panes” para distintas posiciones son el modo SNI (*Single Line Network Installation*) y DBC (*Direct Binary Communication*). Ambos modos se adaptan a las características, el diseño de los transportadores actuales de la línea y el comportamiento del proceso productivo.

Fueron tomadas en cuenta cualidades como ciclo de trabajo para cada transportador, simultaneidad y sincronía entre bandas contiguas y forma de movilización de carga.

Según el modo de control seleccionado conforme el comportamiento de transportadores contiguos y función de los equipos en distintas etapas del proceso, se propone la redistribución de los paneles de control para la alimentación de las nuevas unidades de la siguiente forma:

- Panel 1: Unidad 1 a 7. Modo de control SNI, conexión mediante un solo cable
- Panel 2: Unidad 8 a 17. Modo de control DBC, conexión directa de señales binarias desde PLC y alimentación individual desde panel.
- Panel 3: Unidad 18 a 27. Modo de control SNI para unidades 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 y modo de control separado DBC para unidades 19 y 20.
- Panel 4: Unidad 28 a 31. Modo de control DBC individual, alimentación y señales directo desde panel hasta cada unidad.

- Panel 5: Unidad 32 a 43. Modo de control SNI para unidades 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 y modo de control DBC para unidades 35 y 36.
- Panel 6: Unidad 44 a 57. Modo de control DBC directo e individual desde panel hasta cada unidad.

La topología de cada panel se puede referenciar en el índice de apéndices. Por ejemplo, para el panel 1, la topología de conexión sería como se muestra en la figura 5.1.

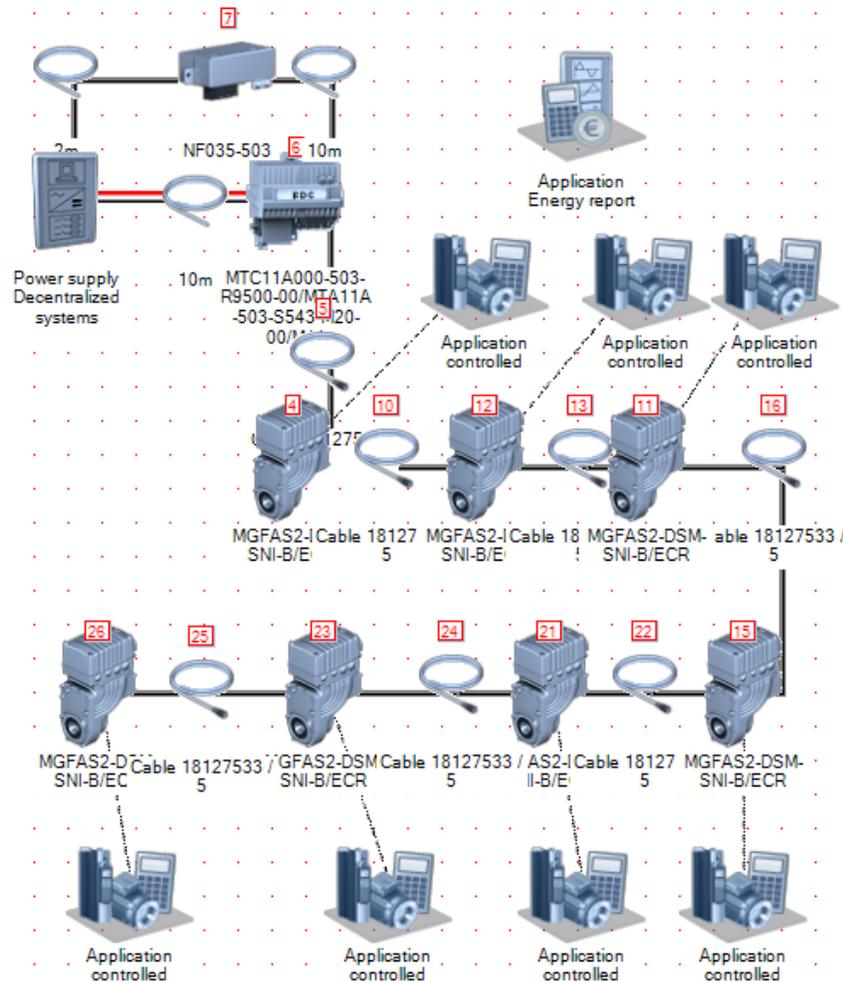


Figura 5.1. Topología de red de unidades alimentadas y controladas desde el panel 1.

Fuente: Elaboración propia. (SEW-Workbench)

5.2 Dimensionamiento y selección de la unidad Movigear preliminar por catálogo

El dimensionamiento y selección de la unidad Movigear sugerida como reemplazo se realiza a partir de los valores de velocidad real medido en eje de salida del reductor instalado actualmente y de la demanda de torque estimado con el porcentaje de carga. El procedimiento sugerido por el fabricante SEW Eurodrive propone la verificación de las capacidades nominales extraídas de catálogo en función de las capacidades requeridas por el proceso productivo.

En este caso se parte de la condición estimada de torque entregado y velocidad medida en el eje, la verificación procede a comparar con las capacidades de velocidad de salida y torque nominal a esa misma velocidad para unidades Movigear en rango extendido de velocidad 2000:1. Las capacidades son verificadas siguiendo la categoría de torque.

Tabla 5.1. Datos de torque entregado estimado y velocidad de eje de salida medida para unidad 43 de “línea panes”

UNIDAD	UBICACIÓN	POTENCIA mecánica (HP)	TORQUE Ma NOM (lb.pulg)	TORQUE Ma CARGA (lb.pulg)	VEL NOM (rpm)	VEL REAL (rpm)	Tamaño Movigear
43	TRANSPORTADOR FINAL DE MOLDES	1.5	194.2	120.3	83	55	MGF 2

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

La tabla 5.1 muestra el resultado de cálculo de torque entregado estimado a partir del porcentaje aplicado al torque nominal obtenido de la placa del equipo, al igual que la velocidad nominal y medida en el eje de salida del reductor. Con los valores de operación actuales, “Vel real” y “Torque Ma Carga”, se verifica la capacidad según el catálogo de la GAMA. La siguiente figura muestra la selección preliminar de la unidad Movigear que satisface la necesidad del proceso.

Se comparan los valores “ n_a ” a 2000 rpm, el cual corresponde a la velocidad de salida del reductor cuando el motor gira a 2000 rpm, de igual se compara el valor “ M_a ” a 2000 rpm de forma que no sea menor al necesario para movimiento del transportador. Otro valor de importancia en la selección correcta de la unidad es el torque pico, M_{apk} , pero debe ser verificado mediante cálculos que involucran coeficientes de fricción de las bandas y

medición de la aceleración y desaceleración del proceso, los cuales no son del conocimiento de la empresa de panificados y no han podido ser obtenidos por limitación de acceso a equipos de medición adecuados.

MGF..2../ECR (extended control range)													
	n_a		M_a					M_{apk}			$M_{aEmerg Off}$	i_{tot}	Weight
	at $n_e=$ 1 rpm [rpm]	at $n_e=$ 2000 rpm [rpm]	at $n_e=$ 5 rpm [Nm]	at $n_e=$ 500 rpm [Nm]	at $n_e=$ 1000 rpm [Nm]	at $n_e=$ 1500 rpm [Nm]	at $n_e=$ 2000 rpm [Nm]	at $n_e=$ 5 – 1500 rpm [Nm]	at $n_e=$ 1750 rpm [Nm]	at $n_e=$ 2000 rpm [Nm]	[Nm]		[kg]
3- stage	0.04	71.3	113	113	113	113	113	220	220	185	330	28.07	16.0
	0.03	60.6	133	133	133	133	133	220	220	218	330	33.02	
	0.03	53.7	149	149	149	149	149	220	220	220	330	37.24	
	0.02	47.4	169	169	169	169	169	220	220	220	330	42.19	
	0.02	44.4	181	181	181	181	181	220	220	220	330	45.03	
	0.02	38.8	200	200	200	200	200	220	220	220	330	51.51	
	0.02	36.2	200	200	200	200	200	220	220	220	330	55.25	

Figura 5.2. Selección preliminar de catálogo de reemplazo para unidad 43 de “línea panes”.

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

El procedimiento anterior se repite para todas las unidades sin tomar en cuenta otros datos propios del proceso o diseño del transportador. El desconocimiento de los datos de anteriores, puede significar un sobre o subdimensionamiento, pues no toma en cuenta las necesidades de aceleración y detención del transportador, los cuales son las condiciones de carga más crítica y de mayor exigencia de la máquina.

5.3 Dimensionamiento y selección de la unidad Movigear a través de programa *Workbench*

Para el dimensionamiento de todas las unidades de la “línea de panes” se hace uso del software *Workbench* propiedad de SEW Eurodrive. El software permite simular el estado operativo de las unidades Movigear utilizando las condiciones de proceso y otros factores de diseño de los transportadores para determinado tipo de carga y movimiento. La tabla 5.2 muestra las condiciones que son introducidos en el programa simulador como puntos de referencia para obtener la recomendación de características que debe tener el equipo Movigear.

Tabla 5.2. Listado de equipos requeridos para el diseño propuesto y costo adquisitivo de mercado

Listado de costo de adquisición de equipo			
Equipos	Cantidad	Costo por unidad	Costo total adquisitivo
MTC11A000-503-R9500-00/MTA11A-503-S543-M20-00/M11	3	\$4,005.00	\$12,015.00
MGFAT1-DSM-SNI-C/PE	13	\$1,836.00	\$23,868.00
MGFAS2-DSM-DBC-B/ECR	20	\$2,240.00	\$44,800.00
MGFAS2-DSM-SNI-B/ECR	18	\$2,600.00	\$46,800.00
Conductores prefabricados	Metros requeridos	Costo por metro	
PN 18127495 Movigear DxC power	322	\$108.00	\$34,776.00
PN 18127533 Movigear SNI power	128	\$109.00	\$13,952.00
Accesorios			
Conectores tipo glándulas	50	\$7.08	\$354.00
Filtro EMC NF035-503	3	\$1,145.00	\$3,435.00
Panel (PLC principal + 6 gabinetes de protección principal)	1	\$25,000.00	\$25,000.00
		Total aproximado	\$205,000.00

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

Tabla 5.3. Condiciones y valores de proceso para simulación de carga de unidades Movigear

Simulación de proceso WorkBench - Valores de proceso				
Consideraciones		Valor		
Factor de carga máxima		2		
Eficiencia de transportador		0.9		
Tipo de transportador promedio		Rodillos y banda para elementos individuales		
Peso de banda por unidad de longitud		2 kg/m		
Peso total de rodillos		5 kg		
Longitud promedio por transportador		4 m		
Carga en voladizo en eje de reductor		Sin carga en voladizo		
Condiciones invariables		Valor	Variables de proceso	Valor
0 - 40°C		Sí	Masa (kg)	12
Mayor a 1000 msnm		Sí	Velocidad de banda (m/s)	Por unidad
Diámetro de rodillos		100mm		
Peso de banda promedio		16,6 kg	Torque estático (Nm)	Por unidad
Aceleración y desaceleración lineal, carga constante en régimen de velocidad de proceso estable		Inclinación (grados)		0°
		Aceleración de arranque de banda (m/s ²)		2

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

Los datos de la tabla 5.3 han sido recolectados directamente en planta y suministrados por colaboradores de la empresa de panificados, así, por ejemplo, el factor de carga máxima es un requerimiento por parte del usuario final y los pesos de banda y rodillos también son proporcionados por parte de la empresa usuaria. Con esta información introducida en el programa, se ejecuta la estimación de la carga estática como dinámica demandada por el transportador, luego los valores de torque son comparados automáticamente por el mismo programa con los valores tabulados en el catálogo. Posterior a este procedimiento, se obtiene la unidad recomendada sumado al resultado de la simulación en función de las características nominales del equipo.

Para ejemplificar la estimación de carga, se ha tomado de forma aleatoria como referencia la unidad 43 y los valores en la tabla 5.1 junto con los datos en la tabla 5.3, en la tabla 5-4 se muestran los datos calculados.

Tabla 5.4. Estimación de programa *Workbench* de parámetros de funcionamiento para unidad 43 con equipo Movigear tamaño 2

Parámetro	Valor
Torque de salida (Nm)	18,33
Clasificación de velocidad de motor (rpm)	2000
Velocidad actual del motor (rpm)	1201
Torque del motor a 2000 rpm (Nm)	4
Relación de reducción	22,86
Carga efectiva del motor (Nm)	0,6867
Carga efectiva del motor (%)	17,06
Carga máxima del motor (Nm)	1,065
Carga máxima del motor (%)	26,60

Fuente: Elaboración propia (MS Word 2016)

Este procedimiento se repite para todas las unidades determinando el tamaño de equipo necesario y la relación de reducción correcta que satisfaga el proceso. Posteriormente, se realiza la validación técnica ejecutada por el mismo programa.

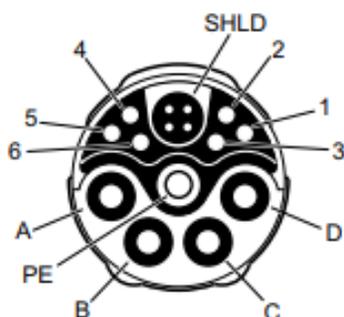
Como aspecto adicional a la selección correcta de unidades, es necesario optimizar la variación en especificaciones entre unidades para transportadores contiguos o pertenecientes a una misma sección; y es debido al comportamiento y desempeño continuo que requiere el proceso. Parte de las virtudes que ofrece la tecnología de los motores de magnetismo permanente y su control de velocidad es que puede mantener el torque entregado en un rango de velocidades más amplio que un motor convencional. La reducción de variantes se hace de modo que unidades colocadas a lo largo de toda la “línea de panes” presenten una relación de reducción de velocidad idéntica.

Este proceso de optimización es manual y realizado en el mismo programa de simulación. A cada equipo recomendado se le varía la relación de reducción a un valor cercano al promedio de las unidades actuales, es cual es de 31. El programa realiza de nuevo la estimación de carga del motor para la nueva relación de reducción. De esta forma se ha logrado acortar la lista de diferentes relaciones de reducción de 21 a 5 diferentes sin afectar el desempeño de los motores cumpliendo con las condiciones de carga iniciales.

5.4 Selección de cables y conectores

Para cada modo de control es necesario el uso de cableado híbrido compatible con EMC para el aislamiento de interferencia electromagnética externa. El cableado comprende la transmisión de potencia y de señales por lo que se utiliza la sugerencia del fabricante SEW extraída de catálogo para cables prefabricados categorizados por aplicación y tipos de conexión con los distintos dispositivos.

- Para el modo de control SNI se ha seleccionado el cable con número de parte 18127533; presenta las características para especificación de conectores tipo M23 H-Tec marca Intercontec y cable marca Helukabel tipo TOPFLEX®-EMV-UV-2XSLCYK-J, calibre AWG 16. Este tipo de configuración permite transmitir alimentación y comunicación por un solo cable para las unidades en la misma red.



Posición	Asignación
A, B, C	Alimentación L1, L2, L3, respectivamente
PE	Tierra
D	Sin asignación
1, 2, 3, 4, 5, 6	Sin asignación, designado a señales
SHLD	Apantallado

Figura 5.3. Representación de la sección transversal para el cable de comunicación para modo de control SIN.

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

- Para el modo de control DBC se ha seleccionado el cable con número de parte 18127495 y presenta las mismas características del seleccionado para instalación tipo SNI con la diferencia de tener el conector en ambos lados del cable por estar unido a cada Movigear de forma individual. Esta configuración se debe a que, al ser prefabricado, los conectores de los extremos vendrían acoplados al cable desde fábrica para la longitud específica. En el caso para SNI, los conectores entre cada unidad deben ser colocados en planta una vez que sea recortada la sección de cable necesaria.

5.5 Selección del controlador o direccionador para modo de instalación SNI

Para llevar a cabo el control de accionamiento y velocidades de las unidades Movigear en red SNI es necesario un dispositivo controlador de la alimentación y administrador de la lógica de control que se genera en el PLC. El dispositivo debe ser compatible con el tipo de red y poseer las características necesarias de la instalación.



Figura 5.4. Dispositivo Movifit FDC.

Fuente: Catálogo Movigear B (2012)

El fabricante SEW Eurodrive ha diseñado para estas aplicaciones la gama de dispositivos Movifit, los cuales poseen la capacidad de ejecutar funciones independientes de la programación del PLC, por lo que pueden colocarse en cualquier parte de la línea solamente requiriendo de alimentación de potencia y una fuente de 24V en corriente directa. Permite la alimentación de sensores y recepción de señales digitales y binarias por lo que lo hace apto para aplicaciones básicas de control de velocidad de transportadores. Además, cuenta con funciones de programación por módulos de aplicación capaces de adaptarse a la necesidad del proceso del usuario, de acuerdo con IEC 61131-3.

Dicha recreación de aplicaciones no será implementada en el presente proyecto debido a que deben ser configuradas con el dispositivo físico instalado y funcional.

El dispositivo Movifit seleccionado es del tipo FDC (*Fieldbus Drive Communication*) y su especificación de catálogo es MTC11A000-503-R9500-00/MTA11A-503-S543-M20-00/M11. Las especificaciones técnicas se pueden ver en la sección de anexos.

CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SISTEMA MECATRÓNICO

6.1 Validación técnica

Para llevar a cabo la validación técnica se hace uso del programa *Workbench* propiedad y autoría de SEW Eurodrive, el cual toma los datos de referencia de carga estimada y la topología de red de diseño para realizar una revisión de las capacidades de todos los elementos constituidos en la red. Los detalles para verificar inician desde cada unidad por separado conforme los valores nominales del equipo y luego analiza la red de dispositivos a nivel general. El programa utiliza bibliotecas específicas de los equipos marca SEW Eurodrive.

Para la verificación individual por equipo se toma en cuenta:

- Estado de carga de la caja reductor en los aspectos de carga nominal y máxima comprobando la resistencia al esfuerzo de torsión interna según especificaciones para el régimen continuo y el régimen temporal de arranque con carga.
- Estado de carga del motor en los aspectos de límite dinámico, carga nominal efectiva y máxima temporal en régimen de arranque.
- Graficado del estado de carga en cada sección de régimen de velocidad, ya sea en aceleración, desaceleración y velocidad constante, tal y como se muestra en la siguiente figura.

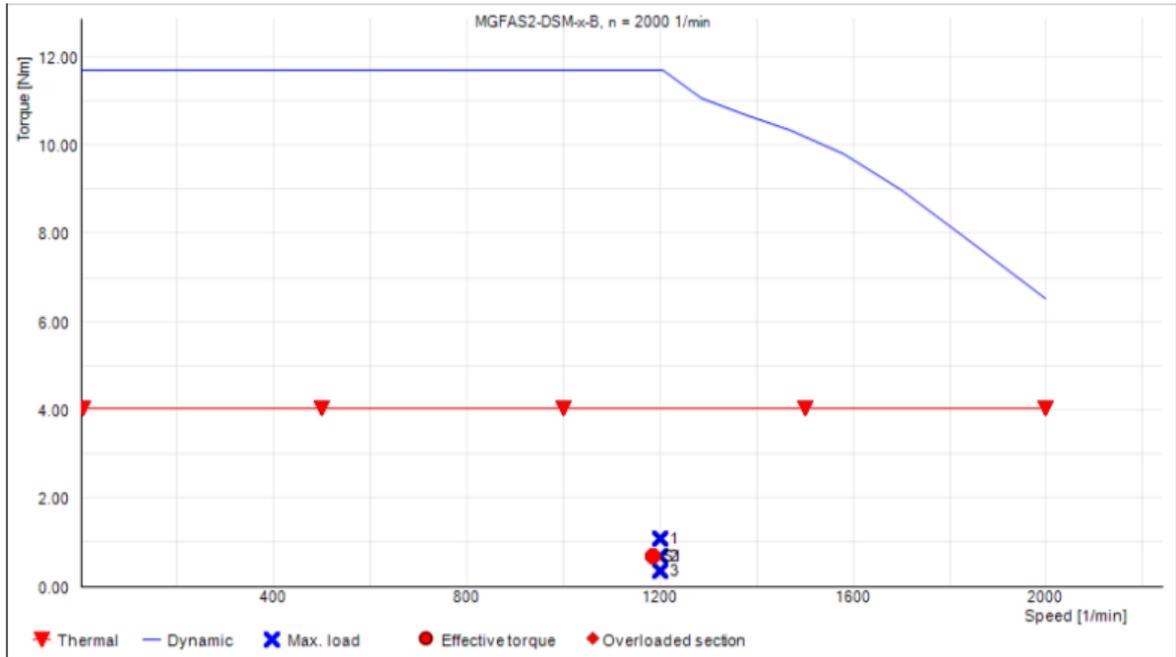


Figura 6.1. Gráfico de desempeño de unidad 43 para el estado de carga estimado.

Fuente: Elaboración propia (SEW *Workbench*, 2019)

En el gráfico 6.1, de carga velocidad-torque, la línea roja indica el límite de torque del motor, la línea azul indica el comportamiento dinámico nominal de la unidad completa. El punto muestra el torque efectivo promediado entre los tres regímenes de movimiento marcados con “x” azules.

Para la verificación general de la red considerada:

- Disposición de red (ordenamiento permitido de los dispositivos)
- Especificaciones existentes de los dispositivos
- Sistema de alimentación y nivel de voltaje disponible correcto de acuerdo con el requerimiento de los dispositivos, por ejemplo, alimentación trifásica de 460vac para equipos Movigear.
- Sistema bus de PLC compatible con controlador Movifit FDC
- Caída de voltaje en corriente alterna y corriente directa no mayor a 5% para la longitud de cableado total.
- Verificación de tipo y calibre de cableado adecuado para el nivel de corriente máximo y nominal, además para el tipo de comunicación seleccionado.

- Conexión de los resistores de frenado para controlador Movifit FDC
- Verificación de carga de cada actuador realizada y aprobada

La validación técnica requiere considerar las protecciones de línea necesarias para cada unidad y para la línea principal, de acuerdo con la sección 430-2 del código NEC, si un equipo está marcado con protección incorporada para sobre - corriente, no es necesario agregar protección adicional. Cada equipo Movigear cuenta con su protección de sobrecarga incorporada en el cabezal electrónico. De igual forma el dispositivo Movifit FDC cuenta con una protección de sobrecarga incorporada modelo MS325 de la marca ABB.

6.2 Validación económica

La validación económica se analiza desde el punto de vista de inversión inicial y retorno de la inversión a partir de la reducción del consumo energético estimado con el cambio de tecnología de mayor eficiencia y reducción de pérdidas en cableado de potencia.

La estimación de la reducción de consumo se realiza comparando los escenarios actuales y propuesto con las unidades Movigear. El consumo total en ambos escenarios para las 50 unidades parte del estudio se muestra en la siguiente tabla. La estimación de consumo se hace en igualdad de condiciones y periodo en análisis, 5616 horas de funcionamiento anuales (16 horas al día, 6 días a la semana, 52 semanas al año). La tarifa de energía eléctrica utilizada es según la empresa de servicios públicos de Heredia (ESPH) para la categoría TN Industrial 2B clase principal Grupo 2 y 3B como se encuentra categorizada la empresa de panificados actualmente y presenta los siguientes costos.

Tabla 6.1. Tarifa de energía eléctrica de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia

TN-Industrial 2 B, 2C Clase Principal Grupo 2 y 3B, 3B Clase Principal Grupo 3			
Más de 3000 kWh	Cargo por energía sin combustible	Cargo por CVC (costo variable del combustible)	Total
Mínimo 10 kW Demanda	₡86,594.50	₡1,948.40	₡88,542.90
Por cada kW adicional	₡8,659.45	₡194.84	₡8,854.29
Mínimo 3000 kWh energía	₡159,990.00	₡3,600.00	₡163,590.00
Por cada kWh adicional	₡53.33	₡1.20	₡54.53

Fuente: <https://www.esph-sa.com/tipos-de-tarifa>

Tabla 6.2. Consumo energético total de las 50 unidades de línea panes actual y estimado para el sistema propuesto de la gama Movigear

	Consumo energético total de 50 motorreductores (kWh/año)	Costo anual (colones CR)
Condición actual	73 780	7 193 336,60
Escenario propuesto	19 811	3 942 287,83
Diferencia relativa (%)	73,14	45,19

Fuente: Elaboración propia (MS Word 2016)

La tabla 6.2 muestra la comparación en consumo de energía de las 50 unidades para ambas condiciones estudiadas. La reducción del consumo estimada es de 73,14 %, mientras que el costo anual de energía eléctrica se reduce en un 45% aproximadamente según el modelo tarifario actual de la ESPH.

A partir del resultado de ahorro de energía traducido a ahorro económico, se realiza el análisis del proyecto de inversión diferenciando dos escenarios de inversión inicial.

- 1) Inicialmente la intención de cambio de las unidades se debía solamente para el cumplimiento de los requisitos de producción sanitaria para industrias de alimentos,

que incluye mejoras en características como recubrimientos y pintura epóxica aprobada por USDA, así como contener lubricación de grado alimenticio igualmente aprobado por USDA, visores de nivel de aceite y la capacidad de soportar lavado con químicos. Las unidades reemplazantes conservarían las mismas especificaciones técnicas con el agregado de las nuevas características especiales.

- 2) El segundo escenario involucra las características de la primera intención junto con la satisfacción de las políticas corporativas de ahorro energético mediante aumento de eficiencia de equipos.

El primer escenario de inversión o gasto se daría de forma inminente u obligatoria por lo que se considera como el punto de partida para evaluar la inversión del segundo escenario donde está presente la oportunidad de ahorro de energía eléctrica. Inicialmente el costo de migrar todas las unidades actuales a las nuevas características del primer escenario sería de aproximadamente \$186,400.00, mientras que el costo estimado de la migración a la tecnología Movigear sería de \$205,000.00 aproximadamente, solamente considerando el costo adquisitivo de las unidades y accesorios para instalación.

Con los escenarios expuestos anteriormente el monto real de inversión sería la resta de ambos costos de inversión inicial, \$18,600.00 que es donde se va a representar la ganancia debido a ahorro de energía. Como se mostró en la tabla 6.2 el ahorro anual traducido a dólares sería de \$5,150.00.

Al análisis del proyecto también se le ha sumado la ganancia por la disposición de las unidades instaladas actualmente como un ingreso adicional si se vendieran en al menos un 10 % de su valor de mercado como nuevo (\$186,400 en total), esto sumado en el primer año del análisis.

El análisis de inversión se proyecta a 10 años, equivalente a dos terceras partes de la vida útil de los equipos Movigear. Además, se contempla una tasa de descuento de 20% para la estimación y comparación de valor actual neto y de la tasa interna de retorno al cabo de los 10 años. También se toma en cuenta la depreciación de los motores por el método de suma de dígitos de acuerdo con el reglamento a la ley de impuesto sobre la renta, Decreto N°18455-H.

Tabla 6.3. Resultado de análisis de inversión de la propuesta proyectado a 10 años (valores en dólares)

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Oportunidad		15,150	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510
Costos		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad Bruta		15,150	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510	5,510
Gastos Administrativos y de Ventas		0	0	0	0						0
Gastos no desembolsables (depreciación)		-2,093	-1,953	-1,814	-1,674	-1,535	-1,395	-1,256	-1,116	-977	-837
Utilidad antes de impuestos		13,058	3,557	3,697	3,836	3,976	4,115	4,255	4,394	4,534	4,673
Impuestos sobre la renta		-3,917	-1,067	-1,109	-1,151	-1,193	-1,235	-1,276	-1,318	-1,360	-1,402
Utilidad despues de impuestos		9,140	2,490	2,588	2,685	2,783	2,881	2,978	3,076	3,173	3,271
Gastos no desembolsables (Ajuste)		2,093	1,953	1,814	1,674	1,535	1,395	1,256	1,116	977	837
Nueva inversión requerida	-18,600										
Recuperación de inversion (valor desecho)											14,206
Flujo de efectivo del proyecto	-18,600	11,233	4,443	4,401	4,359	4,317	4,276	4,234	4,192	4,150	18,314
Acumulado	-18,600	-7,367	-2,924	1,477	5,836	10,153	14,429	18,662	22,854	27,004	24,150

Tasa de Descuento (K)	20.00%
Periodo de recuperación (PR) años	2.66
Recuperación de capital (RC)	1.70
Valor actual neto (VAN)	\$7,580.51
Tasa Interna de Retorno (TIR)	32.55%

Maquinaria		Diferencia entre el costo de inversión de reemplazo de unidades idénticas y unidades Movigear
VM	18,600	
VL	-3,953	
Ganancia	14,648	
Imp	-4,394	
VL	3,953	
Recuperación	14,206	

TIR > K
VAN > 0

Fuente: Elaboración propia (MS Excel 2016)

Para las condiciones dadas de vida del proyecto de inversión, se obtiene un valor actual neto mayor a 0 y tasa interna de retorno mayor a la tasa de descuento, por lo que el proyecto de reconversión evaluado a 10 años puede ser una inversión positiva para la empresa de panificados aún con 5 años de vida útil restante de las máquinas. El periodo de recuperación resulta en 2,66 años lo cual puede ser un aspecto de alto interés para la ejecución del proyecto completo y agrega una componente atractiva de inversión al momento de negociación.

7. CONCLUSIONES

- 1) Se llevó a cabo el diagnóstico de la instalación y operación de los motorreductores actuales de los transportadores de “línea Panes” logrando así determinar el porcentaje de carga promedio de 53,6 %, eficiencia general de 77 % y consumo energético anual de 50 unidades motorreductoras de 73,780 kWh/año
- 2) A partir del estado de carga actual y los modos de operación de los distintos transportadores de línea panes fue posible dimensionar un reemplazo para cada motorreductor por un equipo de la gama Movigear marca SEW Eurodrive con su respectivo modo de control de velocidad.
- 3) Se logró realizar la simulación a través del programa SEW Workbench de la condición de carga y consumo de energía eléctrica en un escenario de control descentralizado con equipos de la gama Movigear partiendo de la demanda de torque y el diseño estructural presente en la actualidad en cada transportador de línea Panes.
- 4) Se realizó el análisis de inversión a 10 años para la propuesta de reconversión a tecnología Movigear para lo que se obtuvo un periodo de recuperación de 2,66 años con VAN mayor 0 y TIR mayor a la tasa de descuento, por lo que se concluye que es una inversión de bajo riesgo y con índices financieros satisfactorios para ejecutar la inversión.

8. RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda llevar a cabo un diagnóstico de consumo energético y estimación de estado de carga con instrumentos de medición directos para reducir los porcentajes de desviación en las medidas torque y potencia real demandado por cada motor eléctrico.
- 2) Debe realizarse la medición potencia y carga demandada para cada una de las diferentes recetas durante un periodo de producción completo para asegurar el registro del mayor estado demanda eléctrica y exigencia operativa de cada motor instalado actualmente.
- 3) Se recomienda hacer un estudio comparativo de consumo de energía entre un motor convencional y su reemplazo en la gama Movigear bajo las mismas condiciones de demanda para estimar un posible ahorro energético que pueda ser extrapolado a otros motores eléctricos.
- 4) Se recomienda la supervisión y asesoramiento de un experto de ingeniería de aplicación por parte de SEW Eurodrive para la simulación del estado de carga de una serie de equipos Movigear funcionando en codependencia a través de un control global PLC
- 5) Crear un plan de implementación luego de una posible adquisición de todos o parte de los equipos propuestos.
- 6) Se debe analizar las ventajas adicionales en temas de mantenimiento, instalación y puesta en marcha en una eventual reconversión a tecnología Movigear de forma que pueda agregar valor de ganancia al proyecto mejorar los indicadores financieros.

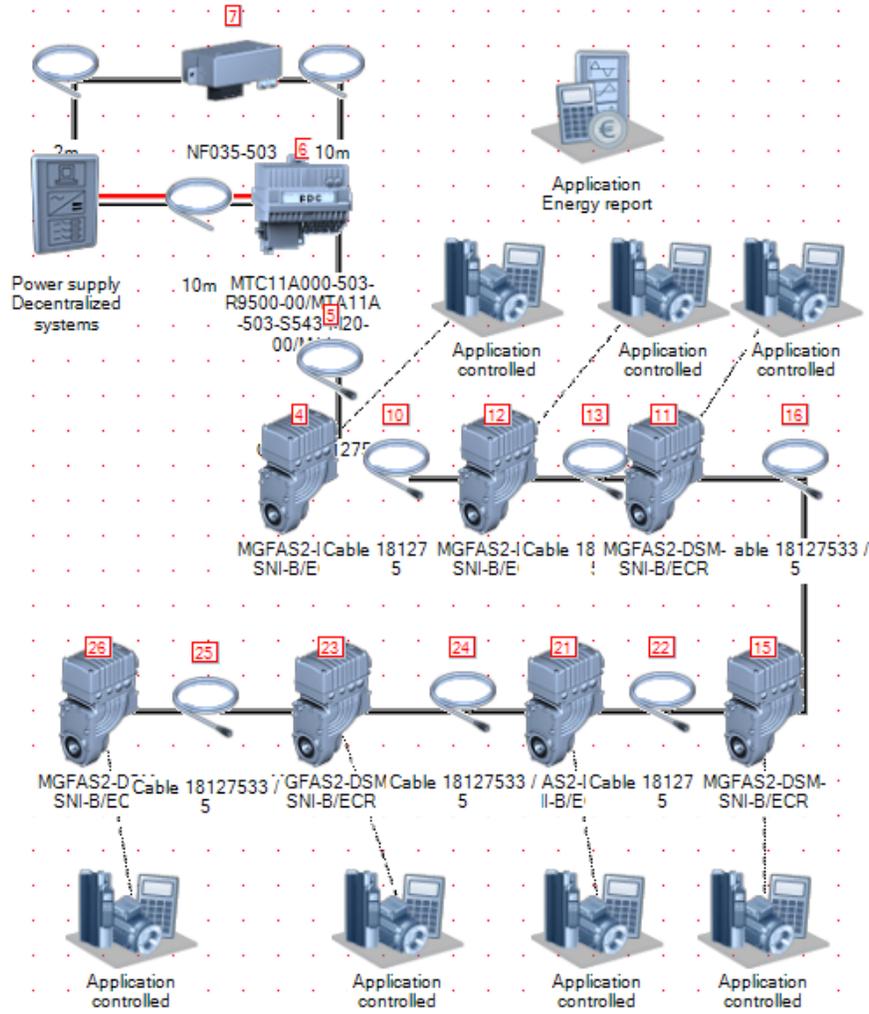
9. BIBLIOGRAFÍA

- El-Ibiary, Y., (2003). An Accurate Low-Cost Method for Determining Electric Motors' Efficiency for the Purpose of Plant Energy Management. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(4). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1215457>. Consultado 14 de abril de 2019
- Emmanuel, A., Wallace, A., Annette, V., Kenneth, J., & James, A., IEEE. *Assessment of Nonintrusive Motor Efficiency Estimators*. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1388670>. Consultado 14 de abril de 2019
- Empresa de Servicios Públicos de Heredia. (2019). *Tipos de tarifa. ESPH*. Recuperado de <https://www.esph-sa.com/tipos-de-tarifa>
- Espinoza, C. L., Jiménez, F., y Fonseca Retana, L. (2007). *Ingeniería Económica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill Education.
- International Electrotechnical Commission. (2014).60034-30-1. *Rotating electrical machines*. Recuperado de <https://webstore.iec.ch/publication/136>. Consultado 30 de marzo de 2019
- Ivankovich, I., (2016) *Automatización en el sistema eléctrico en Siesa para el ahorro energético mediante un sistema SCADA* (Informe de práctica de especialidad). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Lonna, H. & Luha, P., (2003). *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor: an Alternative Motor in Variable Speed Drives*. Energy Efficiency in Motor Driven Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-55475-9_16. Consultado 15 de marzo de 2019

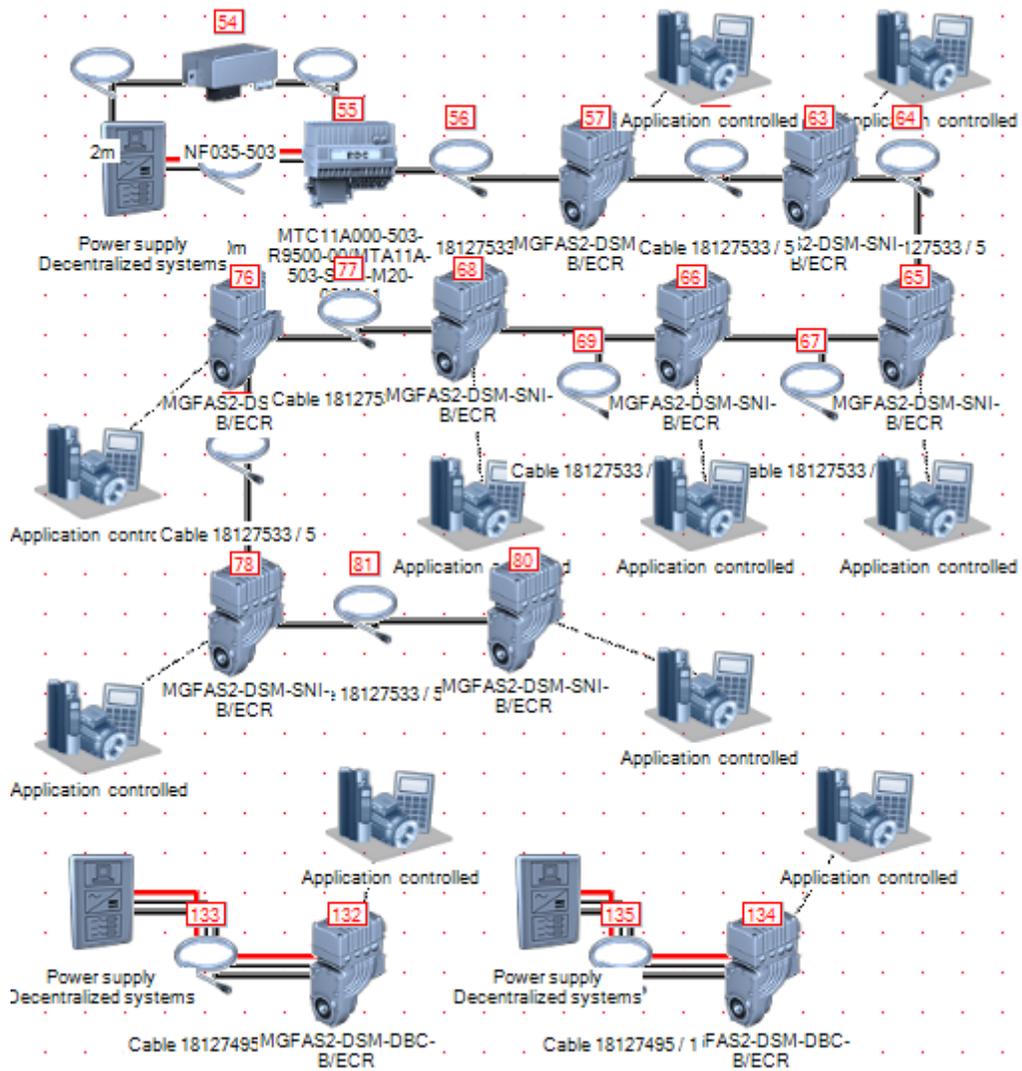
- McCullough, J. (2014) *Energy Report measurement, COCA COLA, TN*. SEW Eurodrive
- NFPA 70 (2008). National Electrical Code., National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- Crespo, G., Cabrera, J. L., Padrón, A. & García, Z. (2017). *Operating efficiency in electromechanical drive motors of Cienfuegos Feed Factory*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/329328221_Operating_efficiency_in_electromechanical_drive_motors_of_Cienfuegos_Feed_Factory. Consultado 14 de marzo 2019
- SEW Eurodrive (15 de marzo de 2019). Catalog Movigear B – Mechatronic Drive System. 12/2012 – 19374828
- Lipo, T. A. (1991). Synchronous Reluctance Machines - A viable alternative for AC Drives? *Electric Machines and Power Systems*, 19, 659-671. Recuperado de <http://lipo.ece.wisc.edu/1991pubs/91-05.pdf>. Consultado 14 de marzo 2019
- Barragán, M. (2013). *Ahorro energético: estimación de carga en motores de inducción* [libro electrónico] Recuperado de <http://catedraendesa.us.es/documentos/AHORRO%20ENERGETICO,%20ESTIMACION%20DE%20CARGA%20EN%20MOTORES%20DE%20INDUCCION.pdf>
- Viego, P., Gómez, J., de Armas, M. y Reyes, R. (2014) Determinación IN-SITU del factor de potencia y la eficiencia de motores asincrónicos a cargas parciales, *Ingeniería Energética*, 35(1), 15-26.

ANEXOS

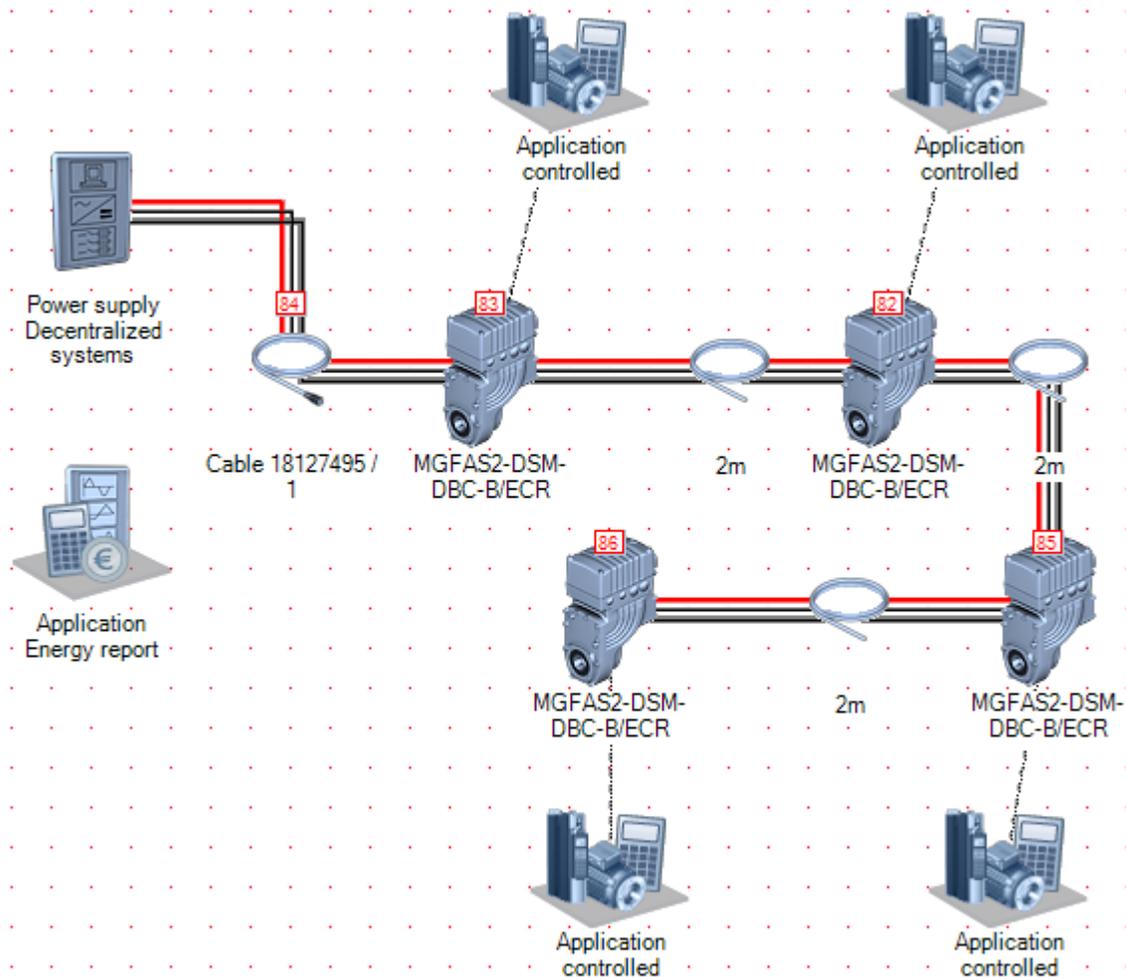
A- Topología propuesta para panel 1



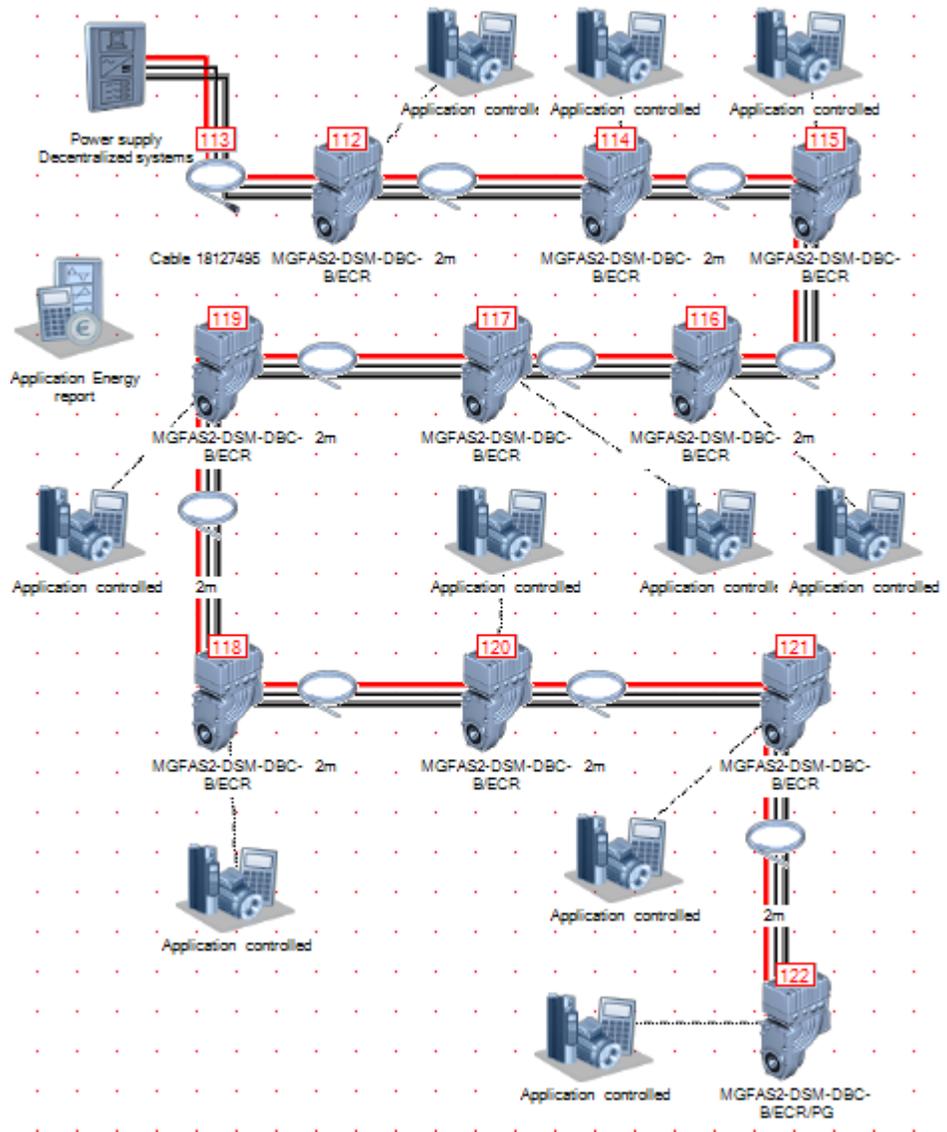
C- Topología propuesta para panel 3



D- Topología propuesta para panel 4



F- Topología propuesta para panel 6



G- Especificación técnica de MOVIFIT FDC



Product information
6/14/2019 11:30:32 AM

MOVIFIT FDC MTC11A000-503-R9500-00/MTA11A-503-S543-M20-00/M11

Electronics box design	: Series (00)
Electrical regulation	: IEC/CE
Series	: Standard (11A)
Installation bus	: SNI
Fieldbus electronics box	: Realtime Ethernet multiprotoc.
Function level	: Parameterizable Controller Standard (CCU)
Memory card	: OMC41B-T0
Installation option	: without
Size	: 1
Fieldbus connection box	: Ethernet (Cu)
ABOX design	: Series (00)
Connection variant	: SEW
Connection configuration	: (MTC) Hybrid;M12/I/O/Bus(S54)
Maintenance switch	: Switch discon. up to 20A (M20)
Mounting plate	: M11 - corrosion-resistant
Nominal line voltage	[V]: 3X380-500
Line frequency	[Hz]: 50/60
Nominal line current	[A]: 20
Output voltage	[V]: UN
Output frequency	[Hz]: FN
Nominal output current	[A]: IN
Ambient temperature min.	[°C]: 0
Ambient temperature max.	[°C]: 40
Degree of protection	: IP65

H- Especificación técnica de Movigear versión B control distribuido SNI



Product information
6/14/2019 11:29:58 AM

MOVIGEAR MGFAS2-DSM-SNI-B/ECR

Currency : EUR

Project planning reference	: Application controlled
Output speed	[1/min]: 0.04-87.5
Output torque	[Nm]: 92
Peak torque	[Nm]: 220
Gear ratio	: 22.86
Mounting position	: M1
Base / top coat	: US12 Stainless steel blue
Built-in type	: Hollow shaft
Shaft geometry	[mm]: 30
Communication type	: SNIO
Motor frequency	[Hz]: 50-60
Motor voltage	[V]: 3X380-500
Rated current	[A]: 1.52
Cos phi	: 0.99
Connection type	: Cable glands
Connection configuration	: Position 2+3
Motor protection type	: IP65
Net weight	[Kg]: 15.7

Additional feature and Options

Color: US12 Stainless steel blue
SNI - Single Line Network Installation
ECR - single-turn encoder / extended control range
Electrical regulation Electrical regulation CE
Output oil seal material FKM oil seals
Oil seal Material Premium Sine Seal - FKM

I- Especificación técnica de Movigear versión B control DBC



Product information
6/14/2019 11:26:09 AM

MOVIGEAR MGFAS2-DSM-DBC-B/ECR/PG

Currency : EUR

Project planning reference	: Application controlled
Output speed	[1/min]: 0.04-71.3
Output torque	[Nm]: 113
Peak torque	[Nm]: 220
Gear ratio	: 28.07
Mounting position	: MU = M1, M2, M3, M4, M5, M6
Base / top coat	: US12 Stainless steel blue
Built-in type	: Hollow shaft
Shaft geometry	[mm]: 30
Communication type	: DBCO
Motor frequency	[Hz]: 50-60
Motor voltage	[V]: 3X380-500
Rated current	[A]: 1.52
Cos phi	: 0.99
Connection type	: Cable glands
Connection configuration	: Position 2+3
Motor protection type	: IP65
Net weight	[Kg]: 16

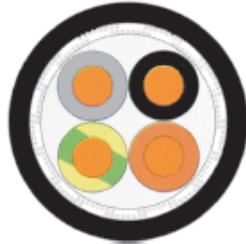
Additional feature and Options

Color: US12 Stainless steel blue
DBC - Direct Binary Communication
ECR - single-turn encoder / extended control range
With internal pressure compensation
Internal pressure compensation gear unit / PG
Electrical regulation Electrical regulation CE
Output oil seal material FKM oil seals
Oil seal Material Premium Sine Seal - FKM

J- Especificación técnica de cableado prefabricado y conectores apantallados EMC

TOPFLEX®-EMV-UV-2XSLEYK-J

for power supply connections to frequency converters, double screened, higher current carrying capacity, 0,6/1 kV, meter marking



Technical data

- Special motor power supply cable for frequency converters adapted to DIN VDE 0250
- **Temperature range**
flexing -5°C to +90°C
fixed installation -40°C to +90°C
- Permissible **operating temperature** at conductor +90°C
- **Nominal voltage**
U₀/U 600/1000 V
- **Max. operating voltage**
A.C. and 3-phase 700/1200 V
DC operation 900/1800 V
- **Test voltage**
4000 V
- **Coupling resistance**
acc. to different cross sections
max. 250 Ohm/km
- **Minimum bending radius**
flexing for cable Ø:
up to 12 mm: 10x cable Ø
> 12 mm: 15x cable Ø
fixed installation 4x cable Ø
- **Radiation-resistance**
up to 80x10⁶ cJ/kg (up to 80 Mrad)

Cable structure

- Bare copper conductor, to DIN VDE 0295 cl.5, fine wire, BS 6360 cl.5, IEC 60228 cl.5
- Core insulation of cross-linked polyethylene (XLPE)
- Core identification BN, BK, GY
- GN-YE conductor
- Cores stranded in concentric layers
- 1. Screen with special aluminium film
- 2. Tinned copper braided screen, approx. 85% coverage
- Outer sheath of special PVC
- Sheath colour: black (RAL 9005)
- With meter marking

Note

- *) The current carrying capacity for permanent operation at ambient temperature of 30°C. For deviating ambient temperatures the conversion factors should be used and for further see the indication in DIN VDE 0298 part 4.
- AWG sizes are approximate equivalent values. The actual cross section is in mm².

Properties

- Low mutual capacitance
- Low coupling resistance for high electromagnetic compatibility
- UV-resistant
- Outdoor application
- This screened motor supply cable with low mutual capacitance of the single cores because of the special XLPE core insulation and low screen capacitance enable a low-loss transmission of the power compared to PVC-sheathed connecting cables
- Due to the optimal screening an interference-free operation of frequency converters is obtained
- The materials used during manufacturing are cadmium-free, contain no silicone and are free from substances harmful to the wetting properties of lacquers

Tests

- self-extinguishing and flame retardant acc. to DIN VDE 0482-332-1-2, DIN EN 60332-1-2, IEC 60332-1-2 (equivalent DIN VDE 0472 part 804 test method B)
- Meets EMC requirements acc. to EN 55011 and DIN VDE 0875 part 11