

**CUANTIFICACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO AL
UTILIZAR UNA ESTRATEGIA CONTROL CONTINUÓ CON
RESPECTO A LA UTILIZACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF, PARA UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN**

FERNANDO CORREDOR NEIRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

**CUANTIFICACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO AL
UTILIZAR UNA ESTRATEGIA CONTROL CONTINUÓO CON
RESPECTO A LA UTILIZACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF, PARA UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN**

FERNANDO CORREDOR NEIRA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.004

*Los que siembran con lágrimas,
Cosecharan con gritos de alegría.
Aunque lloren mientras llevan el saco de semilla,
Volverán cantando de alegría con manojos
De trigo entre los brazos.*

Salmo 126

DEDICATORIA

A Dios fuente suprema de todo saber.

A mi madre Ana Dolores Neira, a quien agradezco el inmenso deseo de aprender que sembró en mí y todo su generoso apoyo.

A mis hermanos Rosmery y Ricardo por el apoyo y la confianza depositada.

A mi novia Nelsy Quitian por su apoyo desinteresado y su valioso aporte en todos los momentos difíciles durante la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a todas aquellas personas e instituciones que han colaborado y hecho posible la realización de este trabajo.

En primer lugar y muy especialmente le doy las gracias a Omar Armando Gelvez Arocha, Ing Mecánico Msc, director del proyecto por su amistad, confianza, acertada dirección y lo mas importante por haber ofrecido una excelente formación tanto académica como profesional, quien presto su decidido apoyo e invaluable colaboración poniendo a disposición toda su experiencia, trabajo, tiempo y valioso conocimiento.

Al profesor Alfredo Acevedo de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, por su valioso aporte en el momento indicado.

A todos aquellos compañeros de academia, con los cuales vivimos y compartimos los mejores momentos, gracias por su amistad.

A las personas que colaboraron con sus valiosos aportes: Ronald Tirado, Vidal Vega, Nelsy Quitian, Jorge Higuera, Alberto elles, Lenin Pinto, Stephanie Calderón.

Fernando Corredor Neira.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO CONCEPTUAL	4
1.1. INTRODUCCION	4
1.2 CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	6
1.3 REGULACIÓN DE LA CAPACIDAD EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	7
1.3.1 Controles de ciclo	8
1.3.2 Controles de capacidad	9
2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	12
2.1 EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN	12
2.2 ACTUADORES, PREAMBUROS Y TABLERO DE CONTROL	13
2.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL	14
2.3.1 Hardware de monitoreo y control	15
2.3.2 Equipo auxiliar de medición eléctrica	18
2.3.3 Software de control	22
2.3.3.1 Comunicación con el fieldpoint	22
2.3.3.2 Declaración y configuración de los módulos fieldpoint	23
2.3.3.3 Recepción y envío de señales	24
2.3.3.4 Comunicación con el usuario	25
3. ESCENARIOS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	29
3.1 TENIENDO EN CUENTA LA CARGA IMPUESTA	29

3.2 TENIENDO EN CUENTA LAS POSIBLES PERTURBACIONES	29
3.3 TENIENDO EN CUENTA LA TEMPERATURA DE REFERENCIA	30
3.4 TENIENDO EN CUENTA LA TEMPERATURA AMBIENTAL EXTERNA	30
3.5 SEGÚN LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS (CONTROL ON-OFF)	32
4. DETERMINACION DE LA POTENCIA Y LA ENERGIA CONSUMIDA POR EL COMPRESOR EN CADA UNA DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL	35
4.1 CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	36
4.1.1 Determinación de la potencia	36
4.1.2 Determinación de la corriente	36
4.1.3 Determinación del voltaje	37
4.1.4 Determinación del ángulo φ	37
4.1.5 Determinación de la energía	38
4.2 CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	38
4.2.1 Medición de la potencia	38
4.2.2 Medición de la energía	40
5. RESPUESTA DEL SISTEMA A LA ACCION DE CONTROL ON-OFF	41
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	41
5.2 DIFERENTES ALTERNATIVAS DE REALIZAR LA ACCIÓN DE CONTROL EN LA ESTRATEGIA ON-OFF	44
5.3 COMO SE REALIZA LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	47
5.4 RESPUESTA DINÁMICA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	48
5.4.1 Comportamiento general del sistema	48

5.4.2 Con relación a la carga	51
5.4.3 Como función de la temperatura ambiental exterior	54
5.4.4 Con respecto a la temperatura de referencia	55
5.4.5 Con relación a las perturbaciones a las que se somete el sistema	55
5.5 CONSUMO DE ENERGÍA CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	59
5.6 INCONVENIENTES DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	62
6. RESPUESTA DEL SISTEMA A LA ACCION DE CONTROL CONTINUO	65
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	66
6.1.1 Respuesta de la estrategia al mantener una temperatura de referencia constante	66
6.1.2 Respuesta de la estrategia ante una condición de capacidad del sistema constante	67
6.1.3 Respuesta de la estrategia ante una condición de capacidad del sistema variable y temperatura de referencia variable	69
6.2 COMO SE REALIZA LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	71
6.2.1 Acción básica de control	71
6.2.2 Forma de variar las RPM en la estrategia de control continuo	73
6.2.3 Control de la frecuencia en la estrategia de control continuo	75
6.3 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	78
6.3.1 Antes de establecerse el equilibrio térmico	79
6.3.1.1 Con carga baja	81
6.3.1.2 Con carga alta	82
6.3.2 Comportamiento del sistema al establecerse el equilibrio térmico	84
6.3.2.1 Como función de la temperatura ambiental exterior	84
6.3.2.2 Como función de las perturbaciones al equilibrio térmico	86

6.4 CONSUMO DE ENERGÍA CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	89
6.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	91
6.5.1 Ventajas de la estrategia de continuo	91
6.5.2 Desventajas de la estrategia de control continuo	93
7. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS	95
7.1 COMPORTAMIENTO DEL COP	96
7.1.1 Variación del COP con la temperatura de saturación del refrigerante	97
7.1.2 Variación del COP con la relación de compresión	99
7.1.3 Comparación del COP obtenido con la estrategia de control on-off contra la estrategia de control continuo	100
7.2 EFECTOS EN LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA	101
7.2.1 Cambio en la velocidad del compresor	104
7.2.1.1 efectos del cambio de velocidad en el efecto de arrastre	104
7.2.1.2 efectos del cambio de velocidad en el calentamiento de cilindro	104
7.2.1.3 efectos del cambio de velocidad en las fugas en pistones y válvulas	105
7.2.2 Cambio en la relación de compresión del compresor	105
7.2.2.1 efectos en el claro	105
7.2.2.2 efectos en el calentamiento del cilindro	106
7.2.2.2 efectos en las fugas	106
7.2.3 Calculo de la eficiencia volumétrica total	106
7.3 EFECTOS EN LA EFICIENCIA MECÁNICA	109
7.4 EFECTOS EN LA EFICIENCIA DEL MOTOR ELÉCTRICO	111
7.5 COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS QUE SE OBTIENEN CON CADA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN CASO PARTICULAR	114
8. CONSUMO DE ENERGIA AL UTILIZAR UNA ESTRATEGIA DE	115

CONTROL CONTINUO CON RESPECTO A LA UTILIZACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	
8.1 TENDENCIA EN EL CONSUMO DE ENERGÍA	115
8.1.1 Sin perturbaciones	115
8.1.2 Con perturbaciones	118
8.2 VALORES DEL CONSUMO DE ENERGÍA CON TODOS LOS ESCENARIOS PLANTEADOS	118
8.3 CONDICIONES QUE INCREMENTAN EL CONSUMO DE ENERGÍA EN CUALQUIER ESTRATEGIA DE CONTROL	118
8.3.1 Disminución de la temperatura de referencia	121
8.3.2 Aumento de la carga	125
8.3.3 Aumento de las perturbaciones sobre el ambiente interior	129
8.4 RAZONES POR LAS CUALES SE CONSUME MÁS ENERGÍA CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	132
9. COSTOS Y FORMAS DE IMPLEMENTAR UNA ESTRATEGIA DE CONTROL TANTO ON-OFF COMO CONTINUO	135
9.1 IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	135
9.1.1 Controles de acción por temperatura	135
9.1.2 Controles de acción de presión	138
9.2 IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO	141
9.2.1 Sistema de control basado en PC	141
9.2.2 Sistema de control basado en un autómeta programable	143
9.2.3 Sistema de control basado en un microcontrolador	145
9.2.4 Costos de la implementación de una estrategia de control continuo	145
10 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	148

10.1 INTRODUCCIÓN	148
10.2 CONCLUSIONES	148
10.3 RECOMENDACIONES	150
ANEXOS	153
BIBLIOGRAFIA	224

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Efecto de la disminución de la carga térmica	5
Figura 2. Consumo específico de potencia	5
Figura 3. Ciclo termodinámico de refrigeración por compresión de vapor	6
Figura 4. Comportamiento de la capacidad del sistema con control Continuo	10
Figura 5. Esquema de la estrategia de control continuo	11
Figura 6. Cuarto frío	13
Figura 7. Actuadores y preactuadores	13
Figura 8. Sistema Fieldpoint	15
Figura 9. Modulo de red FP-1000	16
Figura 10. Modulo de red FP-TC-120	16
Figura 11. Modulo FP-AI-110	18
Figura 12. Equipo de medición eléctrica SIMEAS P	19
Figura 13. Esquema de medición del SIMEAS P	19
Figura 14. Mecanismo de adquisición de datos	20
Figura 15. Mecanismo de control	21
Figura 16. Ventana principal del software	25
Figura 17. Ventana de entrada de datos	26
Figura 18. Ventana de potencia	27
Figura 19. Ventana de factor de potencia	28
Figura 20. Historias de la temperatura del refrigerante	28
Figura 21. Estudio ambiental realizado	30
Figura 22. Estrategia de control on-off con dos diferencias de temperatura	33

Figura 23. Alimentación del motor del compresor	35
Figura 24. Sensor de corriente instalado HAW-10P	36
Figura 25. Relación entre I_{ACT} , I_{REACT} y el ángulo ϕ	37
Figura 26. Ventana de potencia y consumo de energía del software de control utilizando una estrategia de control on-off.	39
Figura 27. Regulación de la capacidad del sistema en la estrategia de control on-off	42
Figura 28. Temperatura de conservación del producto con la estrategia de control on-off	43
Figura 29. Control on-off tradicional	44
Figura 30. Comportamiento de la estrategia de control on-off manteniendo la temperatura del ambiente refrigerado siempre por debajo de la temperatura de referencia y controlando también la temperatura del producto	46
Figura 31. comportamiento de la temperatura del producto(roja) y la temperatura del ambiente interior (azul) con control on-off variando la temperatura del ambiente interior por encima y por debajo de la temperatura de referencia una diferencia de 2 °C para una temperatura de referencia de 10° C	47
Figura 32. Diagrama de bloques para la estrategia de control on-off	47
Figura 33. Comportamiento de la temperatura del ambiente interior del cuarto frío con la estrategia de control on-off	48
Figura 34. Comportamiento de la temperatura de saturación del refrigerante en la estrategia de control on-off	50
Figura 35. Comportamiento de la temperatura del refrigerante en los puntos del ciclo de refrigeración donde existe cambio alguno En sus propiedades para una condición de carga baja, temperatura de referencia -3 °C, diferencia de temperatura 1°C sin perturbaciones al utilizarse una estrategia de control on-off	50

Figura 36. Tiempo de encendido y apagado de los equipos con una estrategia de control on-off para la condición de carga alta, temperatura de referencia -6°C y diferencia de temperatura 2°C sin perturbaciones al ambiente interior	52
Figura 37. Tiempo de encendido y apagado de los equipos con una estrategia de control on-off para la condición de carga alta, temperatura de referencia -6°C y diferencia de temperatura 2°C sin perturbaciones al ambiente interior	52
Figura 38. Temperatura del ambiente interior promedio con una estrategia de control on-off para la condición de carga alta, temperatura de referencia -6°C y diferencia de temperatura 2°C sin perturbaciones al ambiente interior	53
Figura 39. Temperatura del ambiente interior promedio con una estrategia de control on-off para la condición de carga alta, temperatura de referencia -6°C y diferencia de temperatura 2°C sin perturbaciones al ambiente interior	53
Figura 40. Tiempo de encendido y apagado de los equipos con una estrategia de control on-off para la condición de carga alta, temperatura de referencia 0°C y diferencia de temperatura 2°C sin perturbaciones al ambiente interior	56
Figura 41. Tiempo de encendido y apagado de los equipos con una estrategia de control on-off para la condición de carga alta, temperatura de referencia 10°C y diferencia de temperatura 2°C sin perturbaciones al ambiente interior	56
Figura 42. Tiempo de encendido y apagado de los equipos con una estrategia de control on-off para la condición de carga baja, temperatura de referencia -3°C y diferencia de temperatura 1°C sin perturbaciones al ambiente interior	57
Figura 43. Tiempo de encendido y apagado de los equipos con	57

una estrategia de control on-off para la condición de carga baja, temperatura de referencia -3°C y diferencia de temperatura 1°C con perturbaciones al ambiente interior	
Figura 44. Temperatura del ambiente interior y del producto en conservación con una estrategia de control on-off para la condición de carga baja, temperatura de referencia -3°C y diferencia de temperatura 1°C sin perturbaciones al ambiente interior	58
Figura 45. Temperatura del ambiente interior y del producto en conservación con una estrategia de control on-off para la condición de carga baja, temperatura de referencia -3°C y diferencia de temperatura 1°C con perturbaciones al ambiente interior	59
Figura 46. Consumo de energía para una estrategia de control on-off sin perturbaciones	61
Figura 47. Consumo de energía para una estrategia de control on-off con perturbaciones	62
Figura 48. Dinámica del refrigerante durante los periodos de arranque y parada para una temperatura de conservación del producto de 5°C	64
Figura 49. Componentes del balance de energía en un cuarto de conservación	66
Figura 50. Adaptación de la capacidad del sistema a la carga térmica impuesta para mantener constante la temperatura del producto a la temperatura de referencia correspondiente	68
Figura 51. Efecto del aumento de la temperatura de saturación del refrigerante en el diagrama presión- entalpía	68
Figura 52. Disminución de las revoluciones del compresor al	69

aumentar la temperatura de referencia cuando se tiene una carga térmica constante	
Figura 53. Tendencia natural de la capacidad del sistema al aumentar la temperatura de referencia	70
Figura 54. Diagrama de bloques para la estrategia de control continuo	71
Figura 55. Programación de la acción PID en el software de control	72
Figura 56. Variadores de velocidad electrónicos	74
Figura 57. Adaptación de la frecuencia de alimentación del motor del compresor en el variador de velocidad	74
Figura 58. Análisis de vibraciones para el compresor Copeland CS12K6E-TF5	77
Figura 59. Variación de la frecuencia de alimentación del motor del compresor para mantener la temperatura controlada igual a la temperatura de referencia	78
Figura 60. Exactitud de la temperatura del producto con la estrategia de control continuo	79
Figura 61. Temperatura del producto vs temperatura del ambiente interior a una temperatura de referencia de -3°C	80
Figura 62. Comportamiento de la temperatura del producto vs temperatura del ambiente interior cuando se tiene poca cantidad de producto a conservar para una temperatura de referencia de -4°C	81
Figura 63. Frecuencia de alimentación para un poca cantidad de producto a una temperatura de referencia de -4°C	82
Figura 64. Temperaturas del ciclo de refrigeración con poca cantidad de producto al iniciar la conservación del producto	82
Figura 65. Oscilaciones de la temperatura ambiental interior alrededor de la temperatura de referencia, con carga alta a una temperatura de referencia de -6°C	83

Figura 66. Frecuencia de alimentación para una gran cantidad de producto a una temperatura de referencia de -6°C	83
Figura 67. Temperaturas del ciclo de refrigeración con una gran cantidad de producto al iniciarse la conservación para una temperatura de referencia de -6°C	84
Figura 68. Temperaturas del ciclo de refrigeración	85
Figura 69. Oscilación de la temperatura del producto vs temperatura del ambiente interior	85
Figura 70. Cambio en la frecuencia de operación del motor del compresor como resultado del cambio en la carga térmica producto de la variación de la temperatura ambiental exterior durante el transcurso del día	86
Figura 71. Variación de la temperatura del refrigerante con el cambio de la temperatura ambiental exterior	87
Figura 72. Temperatura del producto vs temperatura de referencia con perturbaciones sobre el ambiente refrigerado	88
Figura 73. Variación de la temperatura del refrigerante cuando el sistema se somete a cargas térmicas intermitentes	88
Figura 74. Respuesta inmediata del sistema de control a las perturbaciones hechas sobre el ambiente interior	89
Figura 75. Consumo de energía para una estrategia de control continuo	90
Figura 76. Factores que afectan el consumo de energía	95
Figura 77. El efecto refrigerante en el ciclo de refrigeración	96
Figura 78. Estado transitorio de la temperatura de saturación del refrigerante en la estrategia de control on-off para una condición de carga alta, temperatura de referencia de -3°C , sin perturbaciones	97
Figura 79. Temperaturas del refrigerante con la estrategia de control on-off con una condición de carga alta, temperatura de	99

referencia -3°C y sin perturbaciones	
Figura 80. Temperaturas del refrigerante con la estrategia de control continuo con una condición de carga alta, temperatura de referencia -3°C y sin perturbaciones	99
Figura 81. Temperaturas del refrigerante con la estrategia de control on-off con una condición de carga baja, temperatura de referencia -3°C y sin perturbaciones	99
Figura 82. Diagrama presión-volumen de un compresor recíprocante	102
Figura 83. Diagrama presión volumen específico del compresor	102
Figura 84. Efecto del cambio en las revoluciones del compresor sobre la eficiencia volumétrica para un compresor típico utilizando R134a	107
Figura 85. Efecto del cambio en la relación de compresión sobre la eficiencia volumétrica para un compresor típico utilizando R134a	108
Figura 86. Eficiencia mecánica del compresor al bajar la temperatura de evaporación para un compresor a velocidad constante	110
Figura 87. Motor eléctrico de inducción	111
Figura 88. Valores de eficiencia y factor de potencia típicos para motores eléctricos tipo jaula de ardilla	112
Figura 89. Tendencia del consumo de energía sin perturbaciones al medio interior para todos los escenarios establecidos con una estrategia de control continuo	116
Figura 90. Tendencia del consumo de energía con perturbaciones al medio interior para todos los escenarios establecidos con una estrategia de control continuo	116
Figura 91. Conservación de la energía en el volumen de control con la estrategia de control on-off	119
Figura 92. Conservación de la energía en el volumen de control con	121

la estrategia de control continuo	
Figura 93. Consumo de energía con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de 10 °C y diferencia de temperatura de 2 °C con la estrategia de control on-off	122
Figura 94. Consumo de energía con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de 0°C y diferencia de temperatura de 2°C con la estrategia de control on-off	123
Figura 95. Consumo de energía con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de -6°C y diferencia de temperatura de 2°C con la estrategia de control on-off	123
Figura 96. Frecuencia de operación con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de 0°C con la estrategia de control continuo	124
Figura 97. Frecuencia de operación con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de -3°C con la estrategia de control continuo	124
Figura 98. Frecuencia de operación con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de -6°C con la estrategia de control continuo	124
Figura 99. Valores RPA en función de la temperatura de referencia para las dos condiciones de carga para una estrategia de control on-off con una diferencia de temperatura de 2°C	127
Figura 100. Consumo de energía con una condición de carga alta sin perturbaciones temperatura de referencia de -6°C y diferencia de temperatura de 2°C con la estrategia de control on-off	128

Figura 101. Consumo de energía con una condición de carga baja sin perturbaciones temperatura de referencia de -6°C y diferencia de temperatura de 2°C con la estrategia de control on-off	128
Figura 102. Consumo de energía con una condición de carga alta sin perturbaciones PARA una temperatura de referencia de -3°C con una diferencia de 1°C con la estrategia de control on-off	131
Figura 103. Consumo de energía con una condición de carga alta con perturbaciones para una temperatura de referencia de -3°C con una diferencia de 1°C con la estrategia de control on-off	131
Figura 104. Frecuencia de operación con una condición de carga baja, temperatura de referencia -3°C producto de la aparición de perturbaciones al ambiente interior con la estrategia de control continuo	132
Figura 105. Termostato	135
Figura 106. implementación de un control on-off por termostato de acción indirecta desconectando todos los equipos del sistema de refrigeración	137
Figura 107. Presostato	138
Figura 108. Presostatos mecánicos y su conexionado	139
Figura 109. Presostato electrónico	140
Figura 110. Implementación de un control on-off por presostato desconectando todos los equipos del sistema de refrigeración	140
Figura 111. Sistema Fieldpoint	141
Figura 112. Tarjeta de adquisición de datos	142
Figura 113. Implementación de una estrategia de control continuo a	143

través de un sistema de control basado en PC
utilizando el sistema fieldpoint

Figura 114. Autómata programable	144
Figura 115. Implementación de una estrategia de control continuo a través de un sistema de control basado en un autómata	144
Figura 116. Tarjeta de control	145
Figura 117. Implementación de una estrategia de control continuo a través de un sistema de control basado en un microcontrolador	146

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Compilación de las diferentes pruebas a realizar de acuerdo a los diferentes escenarios relativos al tipo de control	33
Tabla 2. Valores del consumo de energía cuando se utiliza una estrategia de control on-off para cada escenario planteado sin perturbaciones	59
Tabla 3. Valores del consumo de energía cuando se utiliza una estrategia de control on-off para cada escenario planteado con perturbaciones	60
Tabla 4. Consumo de energía con la estrategia de control continuo	90
Tabla 5. COP para una condición de carga baja	100
Tabla 6. COP para una condición de carga alta	101
Tabla 7. Rendimiento bajo condiciones de carga parcial	113
Tabla 8. Factor de potencia bajo condiciones de carga parcial	114
Tabla 9. Comparación de las eficiencias obtenidas con las dos estrategias de control	114
Tabla 10. Consumo de energía con cada estrategia y los porcentajes de ahorro posibles si la estrategia utilizada hubiera sido la estrategia de control continuo	117
Tabla 11. Tiempo de encendido y apagado de los equipos en segundos y el Valor RPA	126
Tabla 12. Costos de la implementación de una estrategia de control continuo	147

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Principios del control de velocidad en los motores a inducción	153
Anexo B. Manual de Programación del Simeas P	165
Anexo C. Mediciones que se pueden realizar con el Simeas P según el tipo de conexión y programación	202

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

T _{ref}	Temperatura de referencia
T _{AI}	Temperatura del ambiente interior del cuarto frío
T _{AE}	Temperatura del ambiente exterior
T. Produc	Temperatura del producto en conservación
Des. V.E	Después de la válvula de expansión
Sal Comp	Salida del compresor
Ent Comp	Entrada al compresor
ER	Efecto Refrigerante
RPA	Relación prendido-apagado

LETRAS GRIEGAS

Φ	Angulo de desviación
--------	----------------------

RESUMEN

TÍTULO:

CUANTIFICACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO AL UTILIZAR UNA ESTRATEGIA CONTROL CONTINUO CON RESPECTO A LA UTILIZACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF, PARA UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

AUTORES:

Fernando Corredor Neira.

PALABRAS CLAVES:

Ahorro de energía, Refrigeración, Control de capacidad, Control continuo, Control on-off, Estrategia de control.

DESCRIPCIÓN:

En la industria de la refrigeración, para ahorrar energía y garantizar la calidad del producto en conservación se han implementado estrategias que controlen la capacidad del sistema. Los sistemas de refrigeración se diseñan para condiciones de carga térmica excesiva previniendo que los equipos sean inadecuados ante una situación eventual, por tanto los equipos están sobre dimensionados la mayor parte del tiempo. Esta situación da como resultado que la temperatura del ambiente refrigerado descienda por debajo de los límites deseables perjudicando la calidad del producto conservado. El objetivo de esta investigación es comparar el consumo de energía con la estrategia de control tradicional (on-off) y una nueva estrategia que incorpora la electrónica a la regulación de los motores de corriente alterna (estrategia de control continuo).

Estudios realizados en otros campos demuestran que la adaptación electrónica de los equipos al tamaño requerido por las condiciones de trabajo, genera un aumento en la eficiencia de los mismos y un ahorro de energía considerable. Partiendo de las alternativas para realizar éstas estrategias se implementó un control basado en PC que permitiera registrar las propiedades del refrigerante y el consumo de energía del sistema ante cualquier situación posible en un cuarto de conservación.

Como resultado de la investigación se encontró que la estrategia de control con mayor ahorro de energía es la continua, que además garantiza una mayor calidad del producto en conservación y un sistema de refrigeración más eficiente. La implementación de dicha estrategia tiene diferentes efectos; de un lado se halló la reducción del costo de almacenamiento de productos perecederos, y de otro lado la disminución de la demanda de energía. Para un estudio más preciso se recomienda determinar exactamente las eficiencias del sistema por medio de la instalación de un medidor de flujo de refrigerante así como de sensores de presión.

SUMMARY

TITLE:

ENERGETIC SAVING QUANTIFICATION BY THE USE OF A CONTINUOUS CONTROL STRATEGY WITH REGARD TO THE UTILISATION OF AN ON-OFF CONTROL STRATEGY FOR A COOLING SYSTEM.

AUTHORS:

Fernando Corredor Neira.

KEY WORDS:

Energy Saving, Cooling, Capacity Control, Continuous Control, On-Off Control, Control Strategy..

DESCRIPTION:

The refrigeration industry has implemented strategies that control the capacity of the system with the purpose of saving energy and assuring the quality of the product in preservation. Always, the cooling systems are designed to cover requirements of excessive thermal charge avoiding inadequacy of the equipments face to possible situations. Because of that fact, the equipments are the majority of the time over -dimensioned. This situation results in the drop of temperature of the cooled atmosphere below the desired limits injuring the quality of the preserved product. The objective of this research is to compare the energy consumption with the traditional on- off control strategy and a new strategy, which incorporates the electronics to the control of alternating current engines (continuous control strategy).

Surveys in others fields have showed that the electronic fitting of equipments to the required size by the work characteristics generates an increase in the efficiency and a considerably energy saving. Starting from the various alternatives to develop these strategies, it was implemented a pc control based that would allow to record the properties of the refrigerant and the energy consumption of the system face to any possible situation in a preservation room.

As a conclusion of the research. It was found that the strategy of control with the larger energy saving is the continuous one, which also guarantees a better quality of the product in preservation and a more efficiently cooling system. The implementation of this strategy has some advantages; on the one hand, there is a reduction on the costs in the warehousing of perishable products. On the other hand, there is a decrease in the spending of energy. It is recommended for an accurate study, to determine exactly the efficiencies of the system trough the settling of both flow meters and sensors of pressure.

INTRODUCCIÓN

Casi desde el principio de la existencia del hombre sobre la tierra se hizo necesario encontrar la forma de conservar los alimentos que solo se producían durante ciertas épocas del año para poderlos consumir en el tiempo restante, es natural entonces que el hombre descubriera y desarrollara métodos de preservación de alimentos tales como el secado, el ahumado, escabechado y salado, antes de que tuviera conocimiento de las reales causas del deterioro de los alimentos.

Con la invención del enlatado el hombre encontró una mejor forma de conservar alimentos de todas clases en grandes cantidades y por periodos de tiempo indefinidos, pero con el inconveniente de que los alimentos enlatados adquieren un sabor distintivo que difiere generalmente del producto original. Años mas tarde se encontró que el único medio para conservar alimentos en su estado original es por refrigeración; en sus primeros orígenes los equipos de refrigeración eran voluminosos, de alto costo y muy baja eficiencia, pero en el espacio de unas cuantas décadas después, la refrigeración se desarrollo hasta convertirse en una gigantesca y creciente industria con otros objetivos; dejo de preocuparse por la conservación de alimentos en condiciones ingeribles y empezó a preocuparse también por conservarlo con calidad, con respecto a apariencia, olor, gusto y contenido vitamínico, eso significa mantener el producto alimenticio hasta donde sea posible en su estado fresco original.

Con el paso del tiempo se agrego un objetivo más a la refrigeración: la economía, con esta inclusión la calidad de la conservación llego a su cúspide, así cualquier deterioro que fuera suficiente para causar un cambio detectable en la apariencia, olor o gusto de los alimentos frescos reduciría inmediatamente el valor comercial del producto y representaría una pérdida económica.

Además al agregarse la economía como objetivo de la refrigeración se hizo necesario estudiar cuidadosamente métodos para mejorar la eficiencia de los

aparatos de refrigeración, equipos y estrategias de control de los mismos que ahorraran energía sin descuidar la conservación de los alimentos con la máxima calidad posible. Con el desarrollo de la electrónica se ha hecho posible desarrollar nuevas estrategias que lleven a cabo este propósito, realizar el proceso de refrigeración de una forma más eficiente manteniendo el producto a la mejor calidad y lógicamente con el mayor ahorro de energía posible.

Por esta razón este proyecto pretende comparar el ahorro de energía que se presenta al implementarse la estrategia de control mas usada en la industria de la refrigeración (on-off) con una estrategia que se desarrollo a partir de los adelantos de la electrónica en la regulación de velocidad en los motores de corriente alterna y determinar la estrategia que mejor garantice la conservación del producto en su mejor calidad, justificando las razones por las cuales se dan esos resultados.

En el capítulo 1, se define la capacidad de un sistema de refrigeración y la forma como se regula en las diferentes estrategias de control existentes.

En el capítulo 2, se presentan los equipos de refrigeración junto con los de medición y control que se utilizaron para llevar a cabo la investigación.

En el capítulo 3, se describen los criterios que se tuvieron en cuenta para que la investigación se desarrollara bajo todas las posibles situaciones que se presentan en la industria de la conservación de alimentos.

En el capítulo 4, se presenta la forma como se midió la potencia demandada y la energía consumida por el compresor en cada una de las estrategias de control analizadas.

En el capítulo 5 y 6 se analiza el comportamiento con los diferentes escenarios planteados con cada estrategia de control.

En el capítulo 7, se estudian los diferentes factores que contribuyen en la eficiencia con la que trabaja el sistema al implementarse cada una de las estrategias de control y se indica cual es la estrategia que genera los mejores índices de eficiencia al llevarse a cabo el proceso de refrigeración.

En el capítulo 8, se dan los consumos de energía que se presentaron al utilizar cada una de las estrategias y las razones por las cuales se presenta un mayor consumo.

En el capítulo 9, se muestran las formas como se podrían implementar cada estrategia de control y su respectivo costo.

En el capítulo 10, se presentan las conclusiones del proyecto.

En el anexo A, se presenta el principio de los controladores de velocidad electrónicos para motores de corriente alterna.

En el anexo B, se presenta el manual de programación del analizador eléctrico Simeas P

En el anexo C, se presenta las mediciones eléctricas que pueden hacerse con el Simeas P y la fórmula que utiliza el fabricante para determinar la medición.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado relacionadas con la conservación de alimentos (cámaras y cuartos fríos) sujetos a deterioro requieren el uso de temperaturas de almacenamiento óptimas para garantizar la buena calidad del producto y aumentar su vida de almacenamiento.

La buena práctica de la refrigeración requiere que el sistema se diseñe con una capacidad igual o ligeramente en exceso de la carga térmica máxima sostenida. Esto se hace para que el sistema tenga suficiente capacidad para mantener la temperatura de diseño durante periodos de carga máxima. En la mayor parte de las situaciones esto ocurrirá solo por un poco tiempo, por lo general los sistemas de refrigeración trabajan con cargas variables menores a la máxima y el sistema tiende a ser de tamaño excesivo con relación a la carga. Para un sistema sin regulación (compresor girando a revoluciones constantes), bajo condiciones de carga parcial, se presentan condiciones desfavorables como *el descenso de la temperatura del espacio refrigerado y del producto en conservación por debajo de límites deseados* debido a la disminución excesiva de la temperatura de vaporización (ver figura 1) y aumento en la temperatura de descarga del compresor, además el sistema presentara una disminución en la potencia consumida por el compresor pero a costa de un mayor consumo específico por tonelada de refrigeración Hp/Ton (ver figura 2). Esto se debe a la tendencia natural del sistema de acomodarse a la condición de carga baja impuesta sobre el (baja carga significa baja tasa de vaporización del refrigerante que se traducirá en una baja presión de succión a la entrada del compresor, menor densidad del refrigerante a comprimir y menor efecto refrigerante).

Luego para condiciones parciales de carga se hace necesario contar con un medio para regular el sistema, de manera que sea posible mantener constante la

temperatura si el producto lo requiere, adaptando la capacidad del sistema a los requerimientos de carga y de esta forma prevenir un sistema ineficiente y un consumo de energía innecesario.

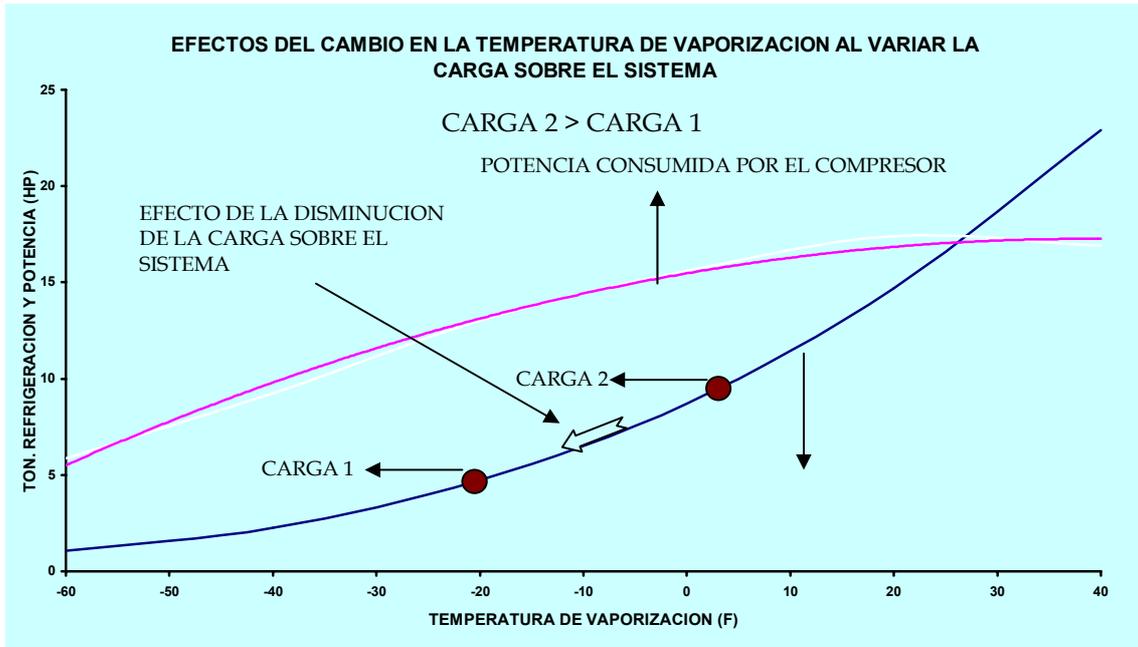


FIGURA 1 EFECTO DE LA DISMINUCION DE LA CARGA TERMICA

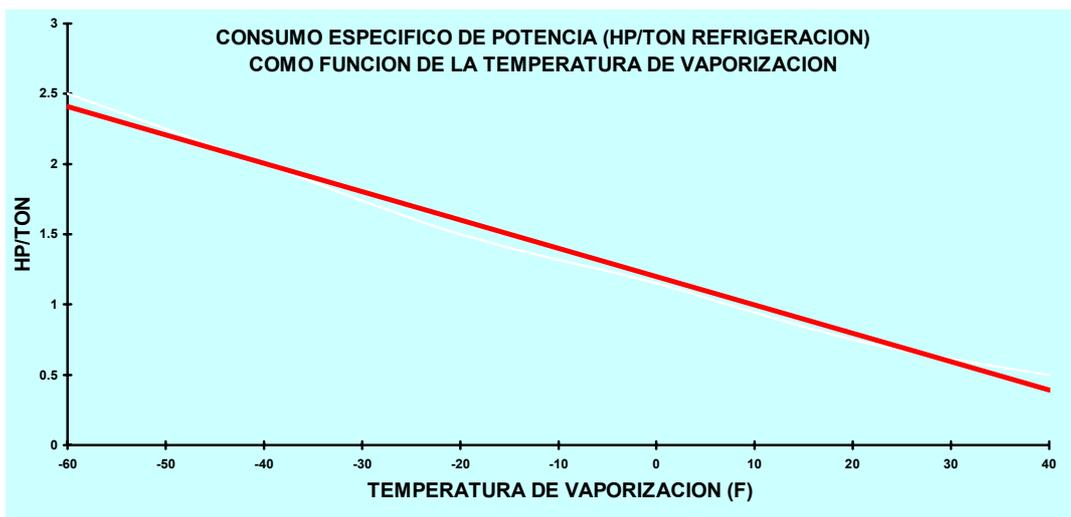


FIGURA 2 CONSUMO ESPECÍFICO DE POTENCIA

1.2 CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

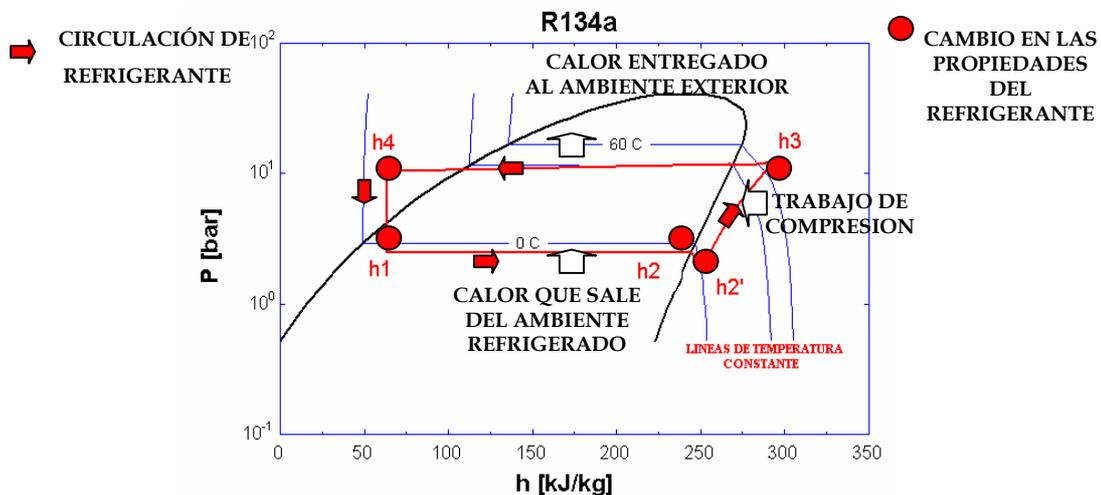


FIGURA 3 CICLO TERMODINÁMICO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESION DE VAPOR

La capacidad de un sistema de refrigeración es la cantidad de calor que el refrigerante que circula por el evaporador, es capaz de sacar del medio refrigerado y es igual al producto de la masa de refrigerante circulado por unidad de tiempo por la diferencia de entalpías del refrigerante entre la salida y la entrada del evaporador

$$CAP = \dot{m}_r * (h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

La masa del refrigerante por unidad de tiempo (\dot{m}_r) esta determinada por la masa que efectivamente desplaza el compresor y corresponde por lo tanto al producto de la densidad del vapor que succiona el compresor (ρ_v) multiplicada por el volumen real desplazado por el mismo por unidad de tiempo (V_r).

$$\dot{m}_r = \rho_v * V_r \quad (1.2)$$

El volumen real por unidad de tiempo es igual a la cilindrada del compresor por las revoluciones del mismo multiplicado por un factor debido a los efectos de reexpansión del refrigerante.

$$V_r = \left(\frac{\pi * D^2}{4} * L \right) * RPM * N * \varepsilon_T \quad (1.3)$$

D = Diámetro del cilindro

L = Carrera del cilindro

N = Número de cilindros

Donde ε_T es igual a:

$$\varepsilon_T = 1 - K * \left(\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

P_d = Presión de descarga del compresor

P_s = Presión de succión del compresor

Entonces podemos decir que la capacidad es:

$$CAP = \rho_v * \left(\left(\frac{\pi * D^2}{4} * L \right) * RPM * N \right) * \varepsilon_T * (h_2 - h_1) \quad (1.5)$$

1.4 REGULACIÓN DE LA CAPACIDAD EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

De acuerdo a lo expresado en la ecuación 1.5 es posible deducir estrategias que permitan ajustar la capacidad del sistema a los requerimientos de carga sin cambiar las condiciones termodinámicas del refrigerante modificando la masa que circula por el sistema mediante la reducción ya sea de:

- El número (N) de cilindros activos
- Las RPM del motor del compresor.

Esto redundara en un ahorro de energía ya que al reducirse la masa y mantenerse constantes las propiedades del refrigerante, el producto $\dot{m}_r \cdot (h_3 - h_2')$ que es la potencia requerida por el compresor \dot{w}_c se reducirá consecuentemente.

Las estrategias de control que prácticamente corresponden a lo definido por la teoría expuesta se pueden clasificar como:

- Estrategias de Control de ciclo
- Estrategias de Control de capacidad

Ambos tipos apuntan a ajustar la capacidad modificando alguno de los factores que la determinan como las revoluciones (RPM), el número de cilindros activos (N).

1.3.1 Controles de ciclo. Permiten desconectar y conectar el sistema, de manera que haga la capacidad igual a cero, apagando el compresor (RPM = 0) ó capacidad igual a algún valor de acuerdo con la temperatura de vaporización a la que se encuentre el sistema (RPM = 1800), generando ciclos de operación y descanso, de acuerdo con la temperatura deseada y el nivel de carga sobre el sistema.

Para cualquier sistema de refrigeración, la longitud relativa de los ciclos de operación y descanso, variará con la carga térmica, en periodos de mayor carga los ciclos de operación serán más largos y los de descanso cortos, mientras que en los periodos de carga mínima, los ciclos de operación serán más cortos y los descanso más largos. Este sistema de control se denomina como control "On-Off", el sistema de control on-off es la estrategia mas comúnmente utilizada.

La longitud del ciclo de descanso está enmarcada por la diferencia de temperaturas que tiene que existir para que el sistema se conecte o desconecte nuevamente, esta diferencia de temperaturas se conoce como Ajuste diferencial, en general la

magnitud del ajuste diferencial y el rango en el que oscilen las temperaturas dependen del tipo de aplicación particular.

1.3.2 Controles de capacidad. Los controles de capacidad me permiten adaptar la capacidad del sistema CAP a la carga impuesta sobre el, trabajando en el punto de máxima eficiencia, sin tener que recurrir a desconectar el compresor, para este tipo de control se modifican los factores de la ecuación de capacidad del sistema (ecuación 1.5) modificando las condiciones de operación del compresor.

Algunas formas de control de la capacidad para economizar energía son:

- **Controlando las revoluciones del compresor**

Con compresores de velocidad variable. Con la llegada de estos compresores se introduce una nueva alternativa de equilibrar la disminución del CAP actuando directamente sobre las RPM del compresor, aumentando o disminuyendo las revoluciones (cambiando el número par de polos) proporcionalmente con la capacidad requerida al sistema, trae la posibilidad de un ajuste limitado de la capacidad de refrigeración ofrecida por el sistema en relación con la demanda térmica exigida. Con la utilización de estos compresores se puede obtener un aumento significativo de la eficiencia de estos sistemas.

Control continuo: otro método de controlar las revoluciones es el instituido por medio de un controlador automático PID, que garantiza corregir cualquier fluctuación del sistema y retornar suavemente a su condición de estado estable. A medida que se disminuye la carga impuesta por el medio refrigerado y la CAP del sistema empieza a decaer, el control permite que el compresor baje sus revoluciones, por medio del uso de un variador de velocidad, proporcionalmente con la reducción de la carga garantizando un ajuste más refinado de la capacidad de refrigeración ofrecida por el sistema

en relación con la demanda térmica exigida al sistema (como se muestra en la figura 4).

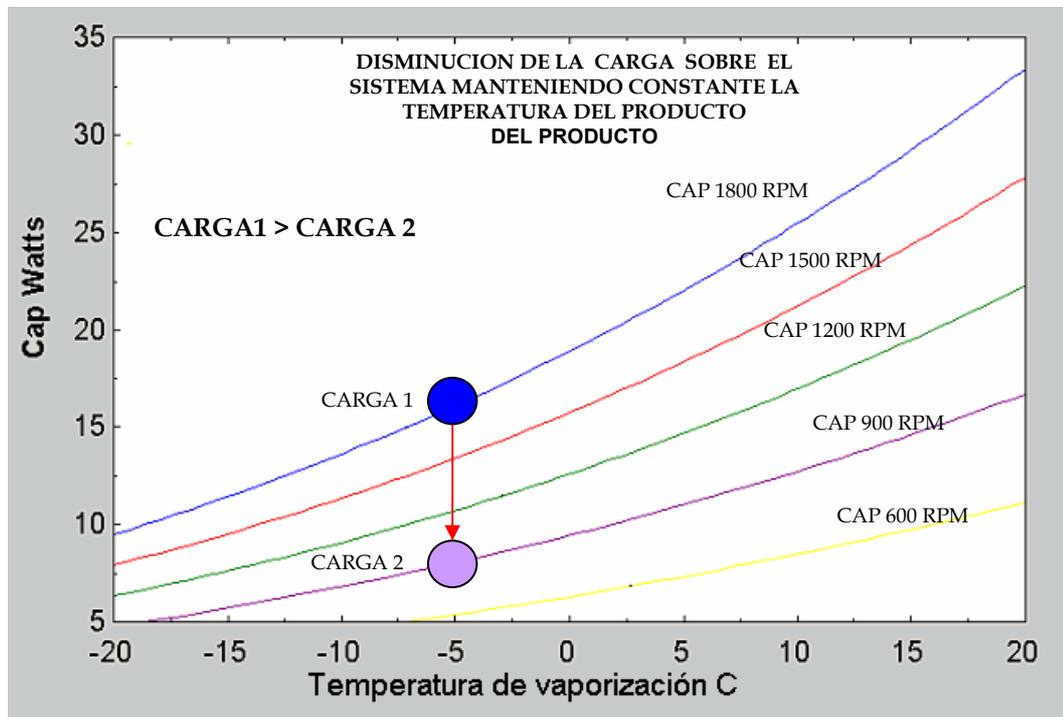


FIGURA 4 COMPORTAMIENTO DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA CON CONTROL CONTINUO

El control continuo compara el valor de la temperatura del producto con el valor de la temperatura de referencia (valor en el que se desea que permanezca el producto refrigerado), y produce una señal de control que reducirá la desviación de la temperatura en la que se encuentra el producto con respecto a la temperatura de referencia, a cero o a un valor muy pequeño (ver figura 5).

- **Descargando uno ó más cilindros.**

Se descargan uno o más cilindros de manera que se hacen inoperantes. Se deriva la descarga de uno o más cilindros, nuevamente a la línea de succión cuando la presión de succión sobrepasa cierto valor predeterminado

abriendo una válvula solenoide que se encuentra entre las líneas de descarga y succión.

Operando dos compresores en paralelo.

Emplean controles individuales de baja presión para alternar los compresores, las presiones de conexión y desconexión individuales se ajustan de manera que los compresores operan desconectándose uno al disminuir la presión de succión y se conecta cuando está se eleva, así acomodando la capacidad del sistema al nivel de carga parcial exigido, en condiciones de carga intensa el sistema operara óptimamente.

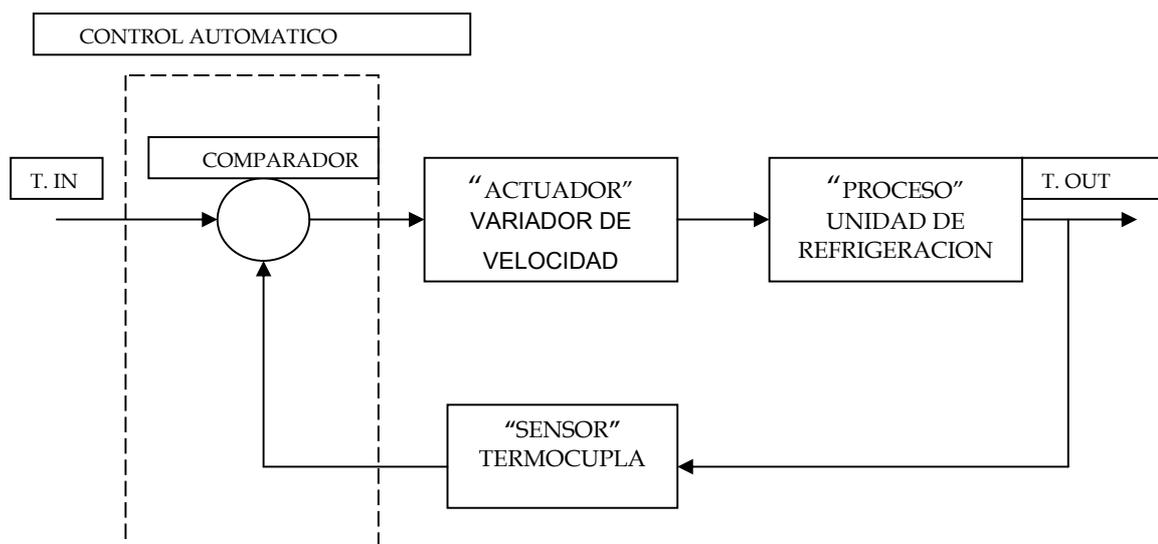


FIGURA 5 ESQUEMA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración utilizado para realizar la comparación entre las estrategias de control esta constituido por tres componentes:

- Equipos de refrigeración
- Actuadores, preactuadores y tablero de control
- Sistema de adquisición de datos y control
 - Hardware
 - Equipo auxiliar de medición eléctrica
 - Software

2.1 EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN.

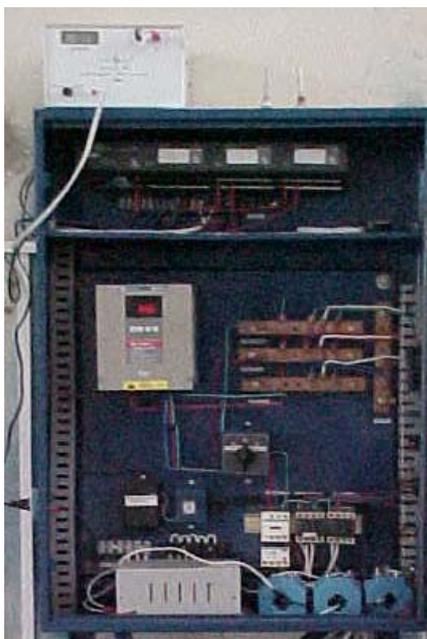
La investigación se realizo en el cuarto frío mostrado en la figura 6 ubicado en el laboratorio de Plantas Térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS y pertenece al Laboratorio de la asignatura de Refrigeración y Aire Acondicionado.

El cuarto frío esta constituido por una cámara de enfriamiento de 122 ft³ (3.45 m³) de volumen interno y paredes de 4" de espesor utilizando poliuretano como aislante, un equipo de refrigeración y congelación que trabaja con refrigerante 134a, compuesto por un motocompresor hermético (1.8 Hp), un condensador de aletas (1/2 Hp), un evaporador de aletas de 2 circuitos (1/2 Hp), un separador de aceite, una trampa de liquido en la succión, un tanque de almacenamiento de liquido, un filtro secador, un visor, dos válvulas de expansión, dos manómetros, uno de alta y el otro de baja y un presostato.

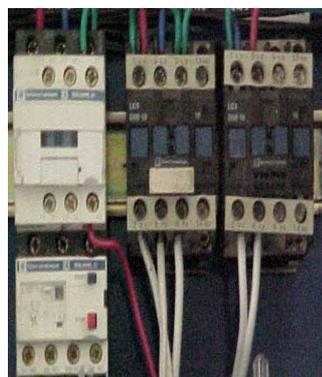


FIGURA 6 CUARTO FRIO

2.2 Actuadores, preactuadores y tablero de control.



a. TABLERO DE CONTROL



b. RELES ACTUADORES DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF



c. VARIADOR DE VELOCIDAD ACTUADOR DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

FIGURA 7 ACTUADORES Y PREACTUADORES

Para realizar el control y la automatización de cualquier sistema se requieren unos dispositivos intermedios entre los equipos encargados de realizar la supervisión y

los equipos que realizan el proceso, estos equipos reciben el nombre de actuadores y preactuadores (ver figura 7).

Según la estrategia que se quiere realizar los actuadores son diferentes, para la estrategia de control On-Off se utilizaron los reles. Los reles actuadores de los motores eléctricos trabajan con niveles de tensión de (220 V de CA) y las señales de control que provienen del Fieldpoint (equipo encargado de la adquisición de datos y control) son de tensión baja y corriente continua (10 V de CC). Para poder realizar el control fue necesario implantar un rele preactuador que trabajara con el nivel de tensión de la señal de salida del fieldpoint que controlara la alimentación de los actuadores y de esta forma conectar o desconectar los equipos (compresor, condensador, evaporador).

Para la estrategia de control continuo el actuador es el variador de velocidad, el cual según la señal eléctrica (0-20 mA) enviada por el sistema de control regula las revoluciones de trabajo del compresor.

2.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL

Para la toma de datos y control fue implementado un sistema basado en PC, que permitiera registrar: las temperaturas del refrigerante en los puntos del ciclo de refrigeración, la temperatura del producto y del ambiente refrigerado, a su vez controlara los equipos del sistema de refrigeración y registrara el consumo de potencia del compresor.

El sistema de monitoreo implementado para automatizar el funcionamiento de la cámara de enfriamiento del Laboratorio de Refrigeración y aire acondicionado consta de un componente hardware (módulos FieldPoint) y un software, que realiza las operaciones programables de los procesos de transferencia de información desde los sensores en cada uno de los puntos de la línea de refrigeración, hasta el computador para su adecuada evaluación y análisis.

2.3.1 Hardware de monitoreo y control.

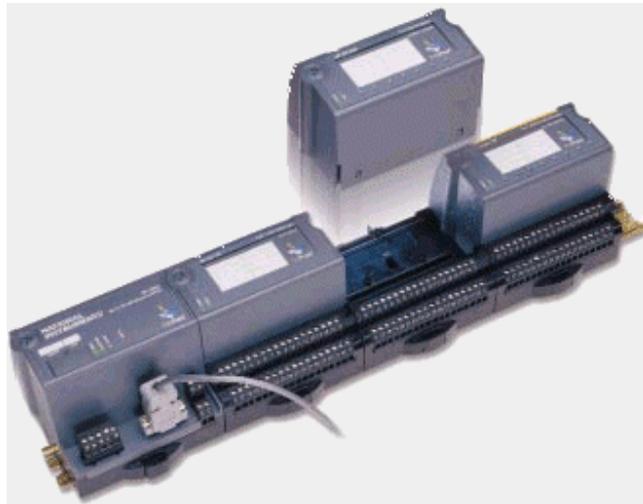


FIGURA 8 SISTEMA FIELDPOINT

El monitoreo y control es realizado a través de un sistema de National Instrument, Fieldpoint (ver figura 8).

FieldPoint es un sistema distribuido modular de E/S que provee soluciones económicas para aplicaciones de control y supervisión industrial. El sistema FieldPoint incluye una variedad de módulos de E/S analógicas y digitales, al igual que el módulo de interfaz de redes inteligentes.

Los módulos fieldpoint empleados para este propósito fueron:

- Modulo de red FP-1000. Es el módulo de interfase para el manejo de comunicaciones entre el computador patrón y los módulos de E/S. La comunicación con el computador se realiza a través del puerto serial RS-232, y con los módulos mediante el bus local de alta velocidad a través del cual se entregan y reciben órdenes para el control del cuarto frío. El modulo de red esta alimentado a 12 VCD (ver FP-1000 figura 9).



FIGURA 9 MODULO DE RED FP-1000

- Modulo FP-TC-120. Es el modulo de Termocuplas, recibe la señal de temperatura desde los diferentes puntos del sistema de refrigeración por sus respectivos canales conectados así:



FIGURA 10 MODULO DE RED FP-TC-120

Canal 0: Termocupla ubicada a la salida del compresor

Canal 1: Termocupla ubicada en el ambiente interior del cuarto frío

Canal 2: Termocupla ubicada en la entrada del compresor

Canal 3: Termocupla ubicada en el ambiente interior del cuarto frío

(Ubicarla en el producto a conservar)

Canal 4: Termocupla ubicada en la salida del evaporador

(Mide la temperatura de Saturación del refrigerante)

Canal 5: Termocupla ubicada antes de la válvula de expansión

Canal 8: A través de este canal el fieldpoint capta la temperatura ambiental

exterior, este canal no necesita Termocupla, el modulo FP-TC-120

viene con ella.

- Modulo FP-A0-200. Es el modulo de salidas analógicas es utilizado para enviar las siguientes señales por sus respectivos canales:

CANAL 1: Envía una señal de 10 V a un Amplificador con un transistor 2N2222 para energizar el relee preactuador encargado de controlar la alimentación de los actuadores y de esta forma desconectar y conectar los equipos del sistema, con una orden del software de control.

CANAL 2: Envía una señal proporcional de 0 - 20 mA a los bornes del variador de velocidad para regular la frecuencia de alimentación del compresor.

- Modulo FP-AI-110. Es el modulo de entradas analógicas. Es el encargado de recibir la señal del sensor de corriente ubicado en las líneas que alimentan el compresor a través del canal 1.

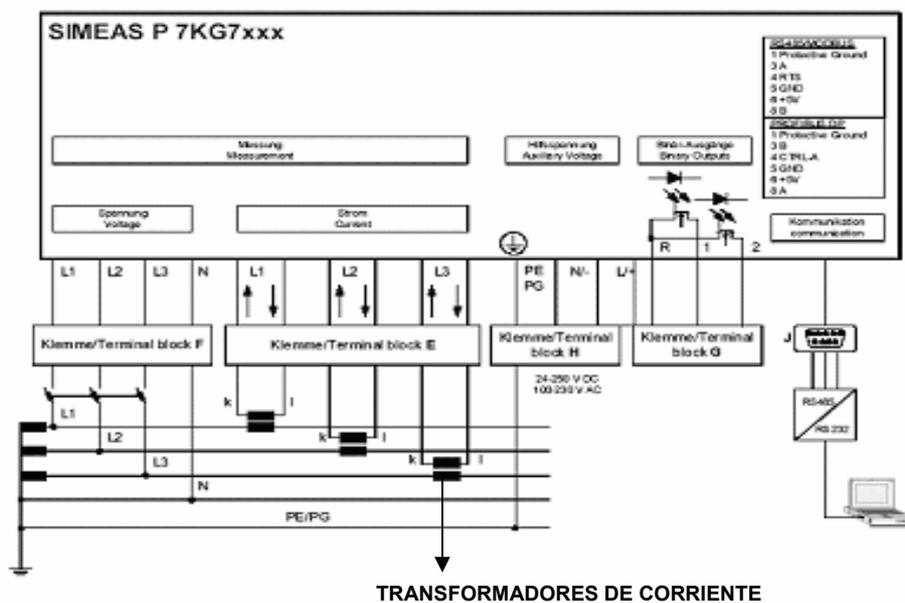


FIGURA 11 MODULO FP-AI-110

2.3.2 Equipo auxiliar de medición eléctrica. Para medir los valores de potencia y consumo de energía utilizando la estrategia de control continuo se utilizó el medidor eléctrico Simeas P mostrado a continuación de la empresa Siemens. Además de los valores de potencia y energía el analizador proporciona la lectura de la corriente y tensión en cada una de las líneas junto con la forma de la onda para observar la calidad de la alimentación, el factor de potencia y el contenido armónico en las líneas. La instalación del equipo se realizó como se muestra en la figura 13 y se programó de acuerdo a lo estipulado por la empresa (ver anexo B), en el anexo C se puede observar las mediciones que se pueden realizar con este medidor eléctrico.



FIGURA 12 EQUIPO DE MEDICION ELECTRICA SIMEAS P



TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

FIGURA 13 ESQUEMA DE MEDICION DEL SIMEAS P

En la figura 14 encontramos esquemáticamente la disposición de los equipos empleados para adquirir los datos de temperatura y medir la potencia consumida según la estrategia de control utilizada.

La figura 15 ilustra el mecanismo de control de los equipos del sistema de refrigeración y la forma como se lleva a cabo su manipulación por el software de control según la estrategia que se haya planteado.

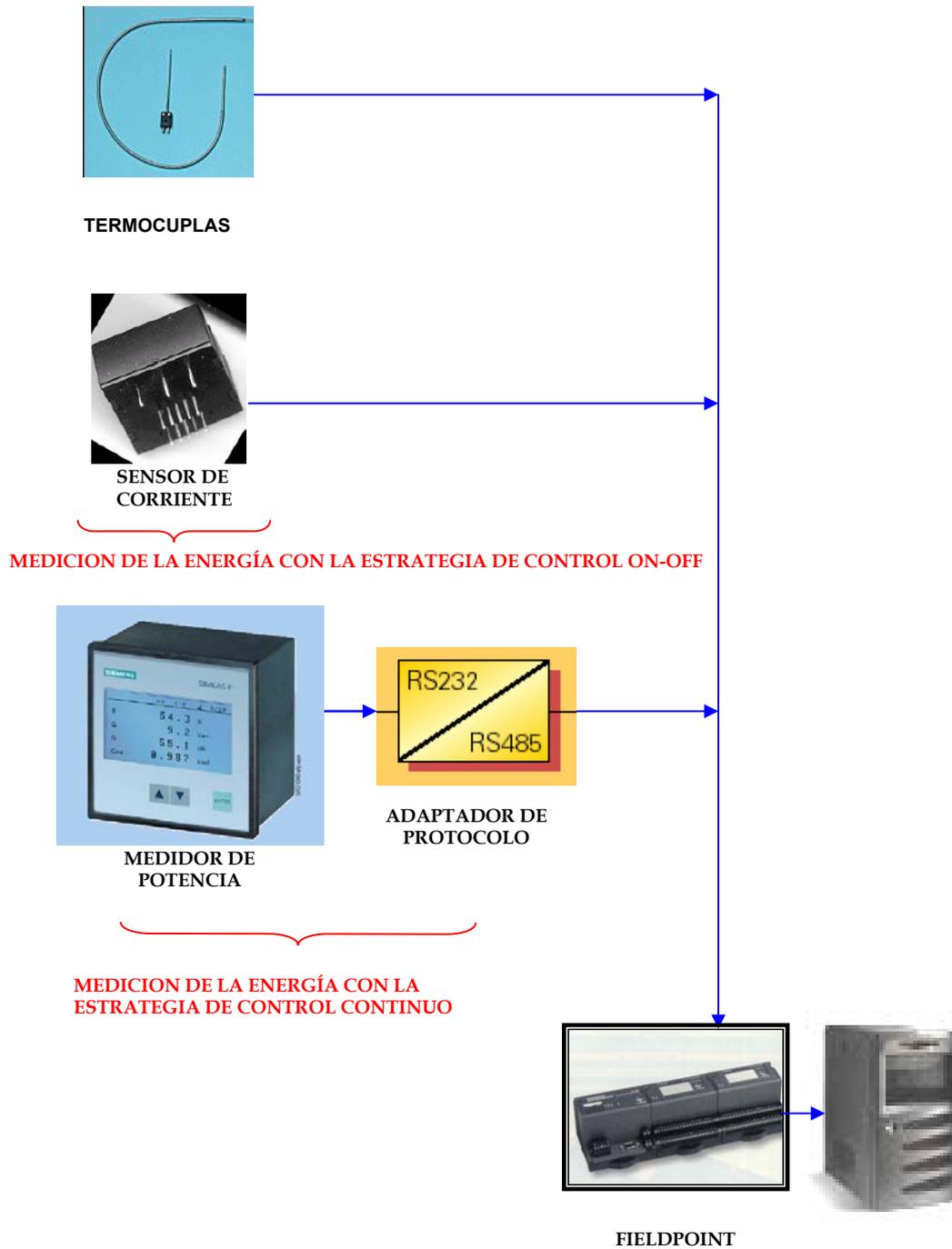


FIGURA 14 MECANISMO DE ADQUISICION DE DATOS

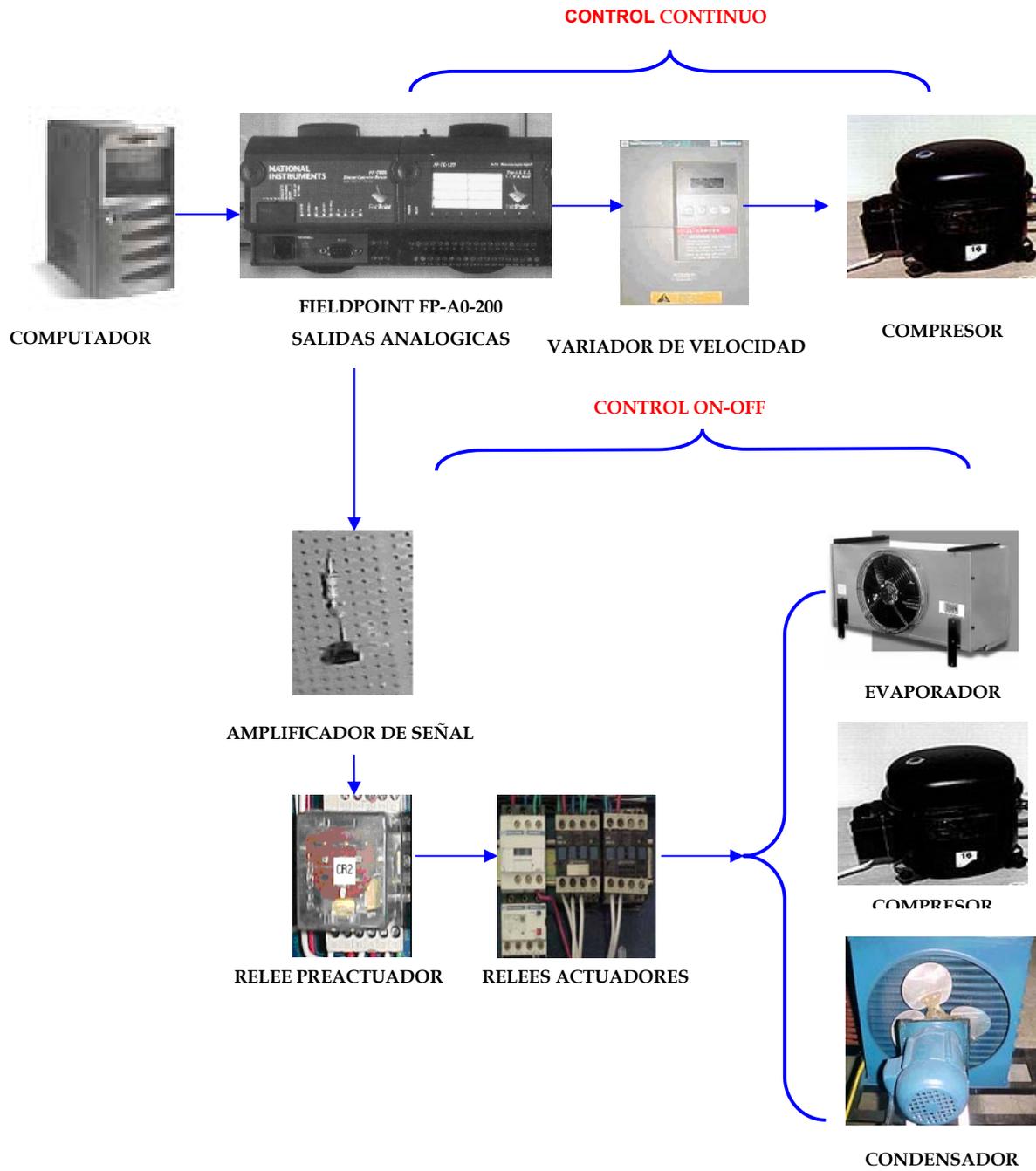


FIGURA 15 MECANISMO DE CONTROL

2.3.3 Software de control. El Programa laboratorio de refrigeración se creó en el programa Delphi 6 y consta de tres partes:

- Comunicación con el Fieldpoint
- Declaración y configuración de los módulos Fieldpoint
- Recepción y envío de señales
- Comunicación con el usuario

2.3.3.1 Comunicación con el fieldpoint. La comunicación con el Fieldpoint se realiza a través del puerto serial mediante 4 unidades básicas que fueron implementadas para este propósito, basados en las herramientas que dispone Windows y el protocolo de comunicación desarrollado por National Instrument para establecer la comunicación con los módulos de red de Fieldpoint:

- Fieldpoint
- FPAuxiliar
- ComunicacionFP
- General

Las Unidades General, FPAuxiliar, ComunicacionFP son llamadas al usar la primera Forma o FrmPrincipal, necesitan ser declaradas después del comando implementation así:

```
Implementation  
uses   General, FPAuxiliar, ComunicacionFP;
```

Estas Unidades se colocan cuando se necesite abrir el puerto de comunicación y declarar la configuración de los módulos Fieldpoint que se estén trabajando.

Cuándo se necesite leer una señal de temperatura o interactuar cualquier otra señal con el Fieldpoint deberá declararse las unidades Fieldpoint y General así:

```
implementation
uses FieldPoint, General;
```

2.3.3.2 Declaración y configuración de los módulos fieldpoint. Al crear la primera forma o FrmPrincipal deberán ser declarados y configurados los módulos Fieldpoint, se comienza por establecer la comunicación y abrir el puerto serial así:

```
FPCommLab:=TCommSerial.Create;
TCommSerial(FPCommLab).Open('COM1',10,115200)
```

Luego se declaran los módulos con los cuales se irán a trabajar:

```
FPBancoLab:=OFPBanco.Create;
FPBancoLab.PComFP:=@FPCommLab;
FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_1000,0);
{0= Modulo de Principal FP-1000}
FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_TC_120,1);
{1= Modulo de Termocuplas FP-TC-120}
FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorRango:=5;
{Rango 5 = -270, + 1770C}
FPModulo.ListaCanales.Canales[x].ValorAtributo[0]:=2;
FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_AO_200,2);
{2= Modulo del Variador FP-AO-200}
FPModulo:=FPBancoLab.CrearModulo(Id_FP_AI_110,3);
{3= Modulo de Corriente FP-AI-110}
```

Los números al final del paréntesis obedecen a la ubicación de los módulos en el orden en el que se acomodan en el panel de control.

Después de crear el modulo Fieldpoint deberán definirse enseguida el rango y el atributo de trabajo para cada uno de los canales, si el rango no es declarado el Fieldpoint escogerá por defecto el rango 0.

Definidos el rango y el atributo de cada uno de los canales para cada modulo, se debe crear cada uno de los canales por los cuales se intercambiaran datos con el Fieldpoint.

```
with OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]).ListaCanales do
begin
  Canales[x].SiLectura:=True;
end;
```

y = El numero del modulo en el orden de colocación en el Fieldpoint.

X = El numero del canal del respectivo modulo teniendo en cuenta que empiezan desde cero

2.3.3.3 Recepción y envío de señales. Para poder Leer una señal de entrada en el Fieldpoint deberá llamarla de la siguiente manera:

```
FPModulo:=OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]);
FPModulo.LeerDatos;
(Botondelphi).Propiedad:=FPFormatValor(FPModulo.ListaCanales.Canales[x],z);
```

Z =numero de decimales que usted quiere que tenga la lectura leída.

Para enviar una señal ya sea de corriente o voltaje deberá ser así especificada:

```

FPModulo:=OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]);
OFPModulo(FPBancoLab.Lista[y]).EscribirCanal(x,k);

```

K = señal de corriente o voltaje que necesito enviar a través del Fieldpoint dentro de los Limites determinados por el mismo.

2.3.3.4 Comunicación con el usuario. Al iniciar el programa se muestra la ventana principal (figura 16) en la que se esquematiza el sistema de refrigeración y se muestran los valores instantáneos de las temperaturas del refrigerante en cada uno de los sitios donde sufre algún tipo de transformación. A su vez se indica el valor de la corriente consumida por el compresor y la temperatura ambiental externa a la que se encuentra el lugar.

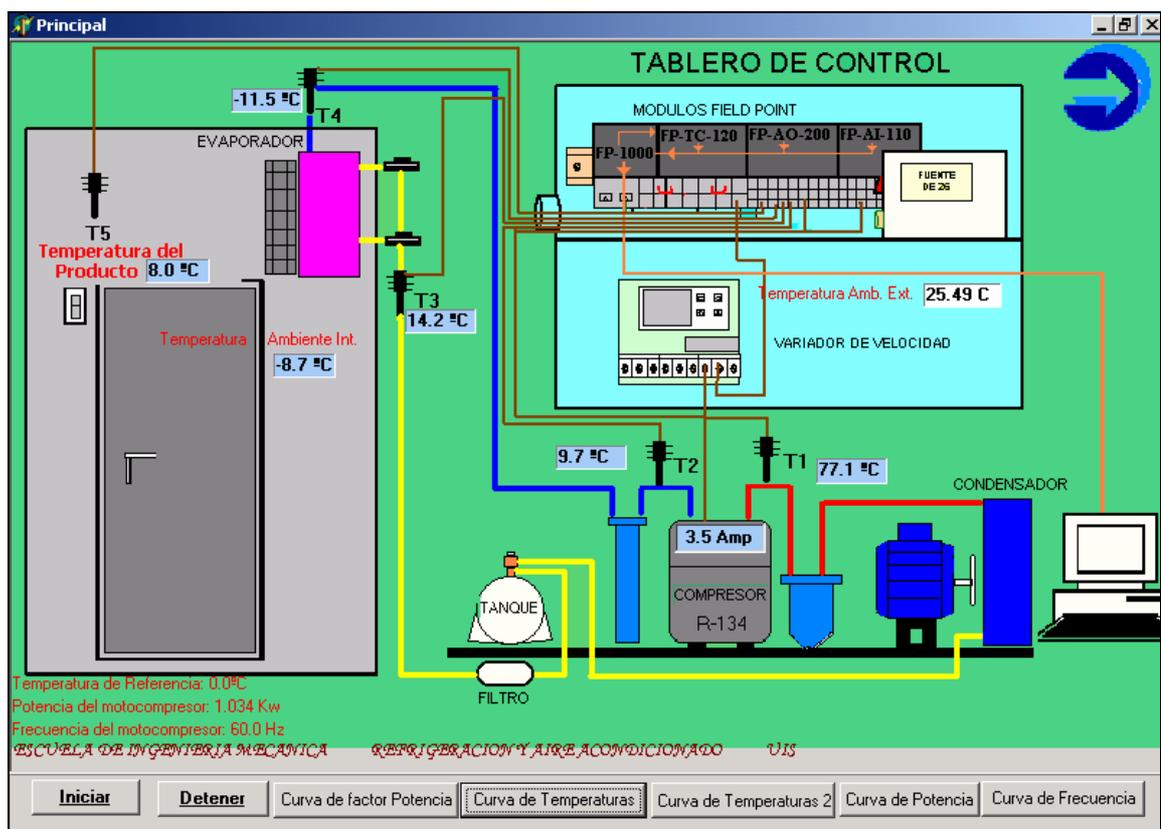


FIGURA 16 VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE

El programa implementado permite al usuario definir el tipo de estrategia que va utilizar para controlar el sistema de refrigeración, al pulsar el botón iniciar en la pagina principal es generada una ventana de entrada de datos (figura 17) en la que el usuario estipula la temperatura de referencia a la que desea conservar el producto, el tiempo que desea se lleve a cabo el control, el tipo de estrategia a usar, en el caso de ser control On-Off la diferencia de temperaturas en la que oscilara el ambiente refrigerado, y en el caso del control continuo las constantes proporcional, integral y derivativa para la regulación PID.

a. VENTANA CON ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

b. VENTANA CON ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

FIGURA 17 VENTANA DE ENTRADA DE DATOS

El software le permite al usuario conocer la potencia activa y reactiva que esta demandando el compresor, y la energía que a consumido el compresor hasta el momento por medio de la graficación de la potencia activa en el tiempo, al seleccionar curva de potencia en la ventana principal (figura 18)

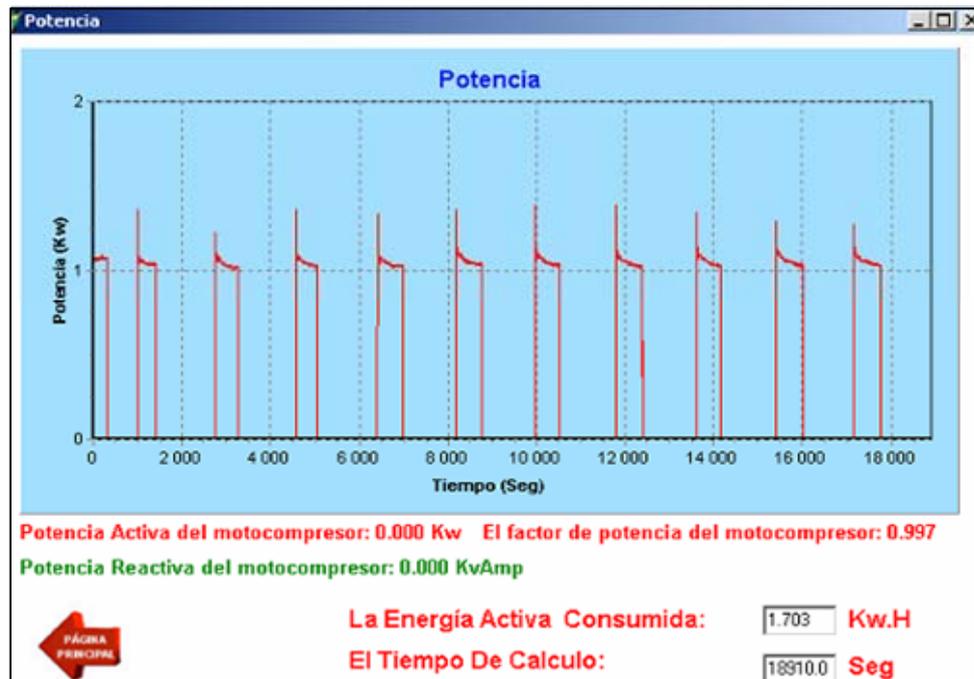


FIGURA 18 VENTANA DE POTENCIA

Al pulsar el botón factor de potencia muestra el comportamiento del factor de potencia en el tiempo

Lo cual permite concluir acerca del grado de aprovechamiento de energía y observar el nivel de eficiencia en la que trabaja el motor del compresor de un sistema de refrigeración (figura 19).

Si en la ventana principal se selecciona curva de temperatura, se generaran las historias de temperatura del refrigerante en cada uno de los sitios donde el refrigerante sufre un cambio durante el ciclo de refrigeración (ver figura 20). Si es seleccionado curva de temperaturas 2 se mostraran las curvas de temperatura del ambiente interior, la temperatura de referencia y la temperatura del producto.

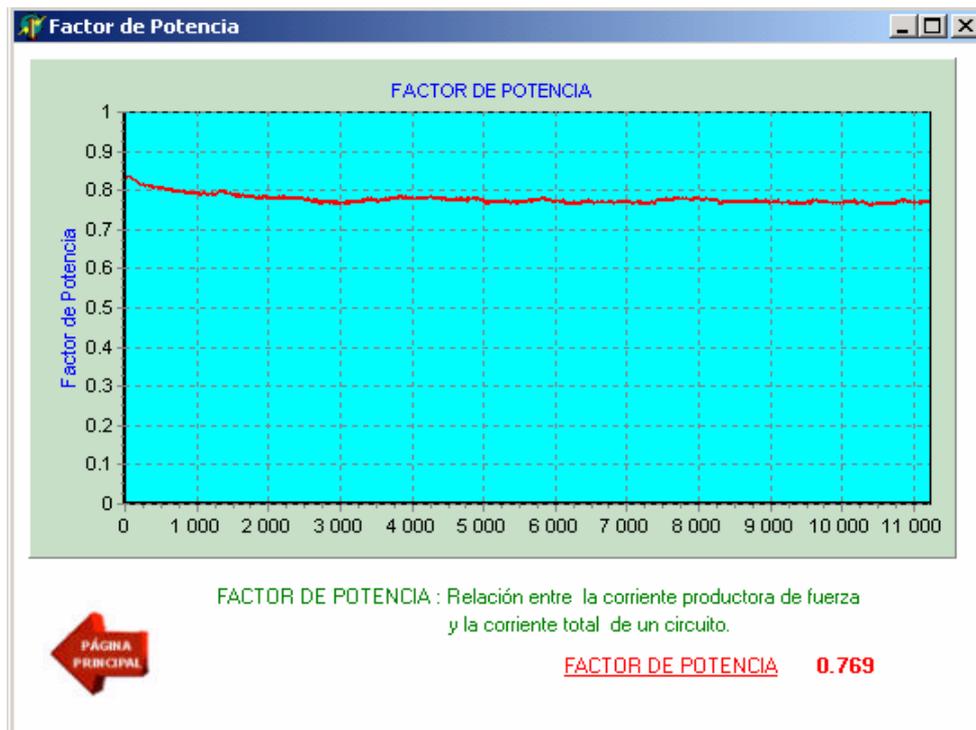


FIGURA 19 VENTANA DE FACTOR DE POTENCIA

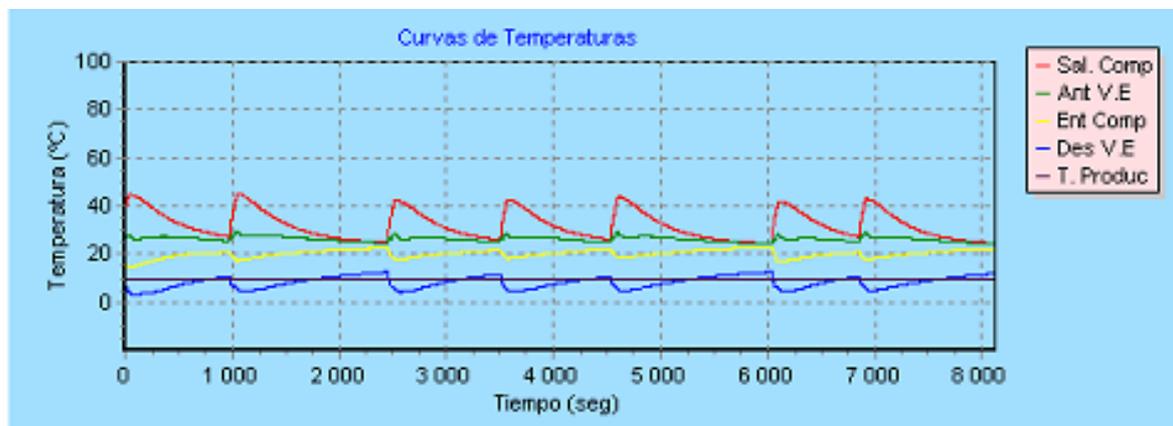


FIGURA 20 HISTORIAS DE LA TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE

3. ESCENARIOS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

El consumo energético de un sistema de refrigeración es ampliamente afectado por las condiciones en que se lleve a cabo, como: la carga impuesta sobre el sistema, la temperatura de almacenamiento óptima del producto (Temperatura de referencia), las diferentes perturbaciones que sufre el ambiente refrigerado, la temperatura ambiental externa y en el caso que de trabajar con la estrategia de control on-off la diferencia de temperaturas a la cual oscila el ambiente interno del cuarto frío. En base a las condiciones anteriores, se crearon diferentes escenarios de trabajo para determinar la energía consumida por unidad de tiempo.

3.1 TENIENDO EN CUENTA LA CARGA IMPUESTA

Cuando un sistema tiene una gran cantidad de producto refrigerado (carga alta) su comportamiento es diferente al que tendría si tuviera una reducida cantidad de producto (carga baja), debido a la mayor cantidad de calor que tiene que retirarse del medio refrigerado inicialmente con carga alta para poder conservarlo a la misma temperatura, y a la inercia térmica que el sistema manejaría.

Para simular un sistema refrigerado con carga alta CA se hicieron las pruebas con una cantidad de producto igual a 70 Gal. de agua, y para simular uno con carga baja CB se hicieron las pruebas con 20 Gal. de agua.

3.2 TENIENDO EN CUENTA LAS POSIBLES PERTURBACIONES

En condiciones normales de trabajo el ambiente refrigerado es sometido a cargas térmicas repentinas provenientes del ambiente exterior y de las personas que

entran al ambiente de conservación cuando es necesario abrir la puerta del cuarto frío para sacar algún elemento conservado.

Para considerar este hecho se hicieron perturbaciones del ambiente interior (ambiente refrigerado), entrando una persona cada $\frac{1}{2}$ hora y permanecía durante 15 segundos en el interior del cuarto frío.

CP = Con perturbaciones

SP = Sin perturbaciones

3.3 TENIENDO EN CUENTA LA TEMPERATURA DE REFERENCIA

Las temperaturas a las cuales se hicieron las pruebas corresponden a temperaturas óptimas de conservación de alimentos para carnes como el tocino $T = -6^{\circ}\text{C}$, pollo $T = -3^{\circ}\text{C}$, salchichas $T = 0^{\circ}\text{C}$, algunas frutas como la naranja o la piña que se aconseja conservarlas a una temperatura $T = 5^{\circ}\text{C}$, y los limones a $T = 10^{\circ}\text{C}$.

3.4 TENIENDO EN CUENTA LA TEMPERATURA AMBIENTAL EXTERNA

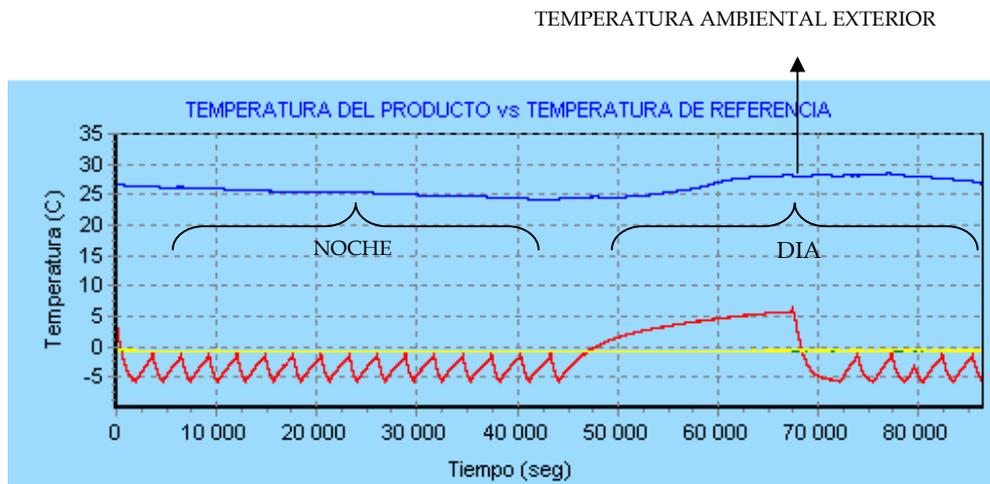


FIGURA 21 ESTUDIO AMBIENTAL REALIZADO

Debido a la gran influencia que tiene la temperatura ambiental sobre el consumo y el rendimiento del proceso de refrigeración, se realizó un seguimiento al

comportamiento del clima durante un largo periodo de tiempo y se decidió realizar las pruebas en las horas de la noche debido a que la temperatura ambiental presenta un comportamiento mas uniforme.

Como la temperatura ambiental promedio en el que se realiza cada una de las pruebas varia día a día de acuerdo a las condiciones climáticas, se realizó un ajuste de la energía consumida a la temperatura ambiental externa promedio en la que fue hecha la prueba, a una energía que se consumiría si se hubiera hecho a una temperatura de 25°C, la cual es la temperatura promedio actual en la ciudad de Bucaramanga. Tomando como base el cálculo del coeficiente de operación del ciclo de carnot (COP), se determino la energía que consumió cada uno de los diferentes escenarios a una temperatura promedio igual para todos.

Para realizar el ajuste de la energía consumida se realizo el siguiente análisis:

El COP del ciclo de refrigeración es:

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, el calor que el sistema de refrigeración saca del ambiente interior del cuarto es:

$$Q_{L1} = \frac{W * T_L}{T_H - T_L} \quad (3.2)$$

El calor que se introduce por las paredes del cuarto se define como:

$$Q_{L2} = U * A * (T_H - T_L) \quad (3.3)$$

Como el objetivo de cualquier estrategia de control es mantener constante la temperatura del producto a la temperatura deseada, el calor que el sistema de refrigeración saca del ambiente interior debe ser igual al calor que se introduce por las paredes proveniente del ambiente exterior entonces:

$$Q_{L1} = Q_{L2} \quad (3.4)$$

$$U * A * (T_H - T_L) = \frac{W * T_L}{T_H - T_L} \quad (3.5)$$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior el coeficiente global de transferencia de calor multiplicado por el área es:

$$U * A = \frac{W * T_L}{(T_H - T_L)^2} \quad (3.6)$$

Como el coeficiente global de transferencia de calor y el área son los mismos cuando la prueba se realiza a cualquier temperatura ambiental externa promedio, que cuando se realiza a 25°C, podemos igualar las dos ecuaciones.

$$\frac{W_1 * T_{L1}}{(T_{H1} - T_{L1})^2} = \frac{W_2 * T_{L2}}{(T_{H2} - T_{L2})^2} \quad (3.7)$$

Entonces la energía consumida a una temperatura ambiental externa de 25°C es igual a:

$$W_1 = \frac{W_2 * (T_{H1} - T_L)^2}{(T_{H2} - T_L)^2} \quad (3.8)$$

W_1 = Energía consumida a la temperatura de 25 °C

W_2 = Energía consumida a la temperatura ambiental exterior promedio.

T_{H1} = Temperatura de 25 °C

T_{H2} = Temperatura ambiental promedio en la que se realizo la prueba.

T_L = Temperatura de conservación del producto.

3.6 SEGÚN LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS (CONTROL ON-OFF)

Para analizar el comportamiento del sistema cuando se trabaja con la estrategia de control on-off y se varía la diferencia de temperaturas a las que oscila fueron tomadas dos diferencias de temperatura, una el doble de la otra.

- La 1era con una diferencia de 1°C
- La 2da con una diferencia de 2°C

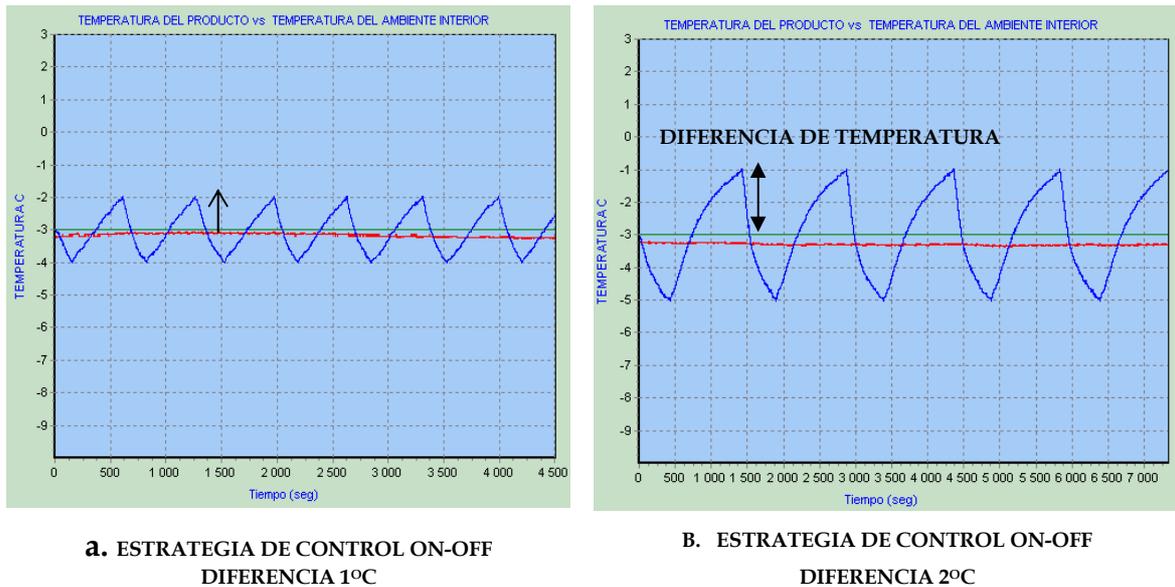


FIGURA 22 ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF CON DOS DIFERENCIAS DE TEMPERATURA

Los escenarios de trabajo estipulados según los anteriores criterios fueron los siguientes; tomando para cada uno de ellos el consumo energético en Kw.h durante un tiempo de 10 horas.

X = Consumo energético en Kwh/año

Tabla 1: Compilación de las diferentes pruebas a realizar de acuerdo a los diferentes escenarios relativos al tipo de control (on-off y continuo) y los parámetros de control (temperatura de referencia, diferencia de temperatura, perturbaciones y tipo de carga)

	ON-OFF DIFERENCIA =1	ON-OFF DIFERENCIA =2	CONTROL CONTINUO
T=-6 CA SP	X	X	X
T=-3 CA SP	X	X	X
T=0 CA SP	X	X	X

T=5 CA SP	X	X	X
T=10 CA SP	X	X	X
T=-6 CB SP	X	X	X
T=-3 CB SP	X	X	X
T=0 CB SP	X	X	X
T=5 CB SP	X	X	X
T=10 CB SP	X	X	X
T=-6 CA CP	X	X	X
T=-3 CA CP	X	X	X
T=0 CA CP	X	X	X
T=5 CA CP	X	X	X
T=10 CA CP	X	X	X
T=-6 CB CP	X	X	X
T=-3 CB CP	X	X	X
T=0 CB CP	X	X	X
T=5 CB CP	X	X	X
T=10 CB CP	X	X	X

4. DETERMINACION DE LA POTENCIA Y LA ENERGIA CONSUMIDA POR EL COMPRESOR EN CADA UNA DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL

El compresor es movido por un motor trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla de 1.8 Hp de potencia nominal a 220 V entre fases como lo indica la figura 23.

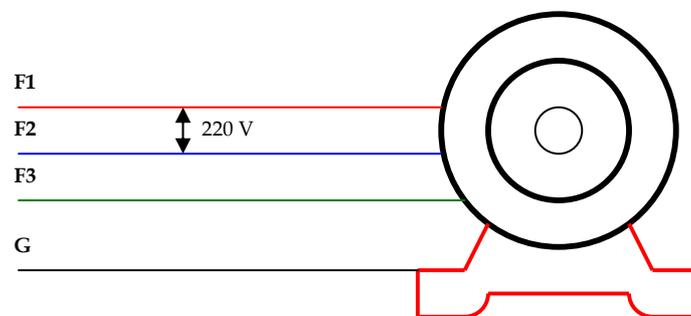


FIGURA 23 ALIMENTACION DEL MOTOR DEL COMPRESOR

La manera como se determino la potencia demandada por el compresor y el consumo de energía del mismo para cada estrategia de control fue diferente, debido a que cuando se establece la estrategia de control continuo el uso del variador de velocidad genera la aparición de perturbaciones electromagnéticas de tipo armónico (los armónicos son tensiones o corrientes de frecuencias que corresponden a múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hertz)).

La aparición de los armónicos ocasiona que los equipos de medición eléctrica que funcionan por inducción magnética proporcionen lecturas incorrectas debido a que normalmente están calibrados para la componente fundamental.

4.1 CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Como se describe en la figura 14 la potencia cuando se utiliza una estrategia de control on-off se determina mediante el software de control en base a la medición de la corriente activa en una de las líneas de alimentación del motor del compresor y a las siguientes consideraciones.

4.1.1 Determinación de la potencia. Para determinar la potencia demandada por el compresor se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$P_{ACTIVA} = \sqrt{3} * V_{rms} * I_{rms} * \cos \phi \quad (4.1)$$

$$P_{REACTIVA} = \sqrt{3} * V_{rms} * I_{rms} * \sen \phi \quad (4.2)$$

V_{rms} = Tensión (rms) entre líneas

I_{rms} = Corriente (rms) en las líneas

$\cos \phi$ =Factor de potencia

4.1.2 Determinación de la corriente. Para calcular la corriente demandada se instalo un sensor de corriente (basado en el efecto hall) en una de las líneas de alimentación del compresor (ver figura 24), para lo cual se supuso un circuito balanceado (según mediciones de corriente hechas en las líneas es una afirmación correcta).



FIGURA 24 SENSOR DE CORRIENTE INSTALADO HAW-10P

4.1.3 Determinación del voltaje. El voltaje se supuso igual a 220 V constante todo el tiempo, esta expresión es correcta ya que en las horas de la noche el voltaje leído en las fases de alimentación presenta esa característica debido a la ausencia de carga en el resto de instalaciones de la universidad.

4.1.4 Determinación del ángulo φ . Para su determinación se aprovecho el hecho de que la corriente reactiva (la encargada de generar el campo magnético del estator) permanece constante al variar la carga sobre el motor y su relación con la corriente activa (la encargada de producir trabajo) es:

$$\tan \varphi = \frac{I_{ACT}}{I_{REACT}} \quad (4.3)$$

Donde:

$$I_{REACT} = \frac{I_{ACT}}{\tan(\arccos \varphi)} \quad (4.4)$$

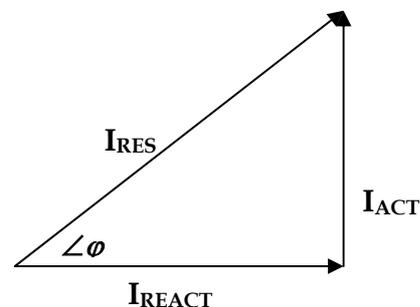


FIGURA 25 RELACION ENTRE I_{ACT} , I_{REACT} Y EL ANGULO φ

conociendo el valor del factor de potencia ($\cos\varphi$) y de la corriente activa según la ecuación 4.4 se puede determinar el valor de la corriente reactiva, para lo cual se realizó un estudio variando la carga sobre el motor para cada temperatura de vaporización (considerando que la temperatura ambiental externa fuera de 25°C para que la presión de descarga del compresor no se incrementara y causara que el motor estuviera más o menos cargado y los resultados fueran imprecisos) utilizando el medidor eléctrico Simeas P de la empresa Siemens que arroja el valor

del factor de potencia y la corriente activa se concluyo que efectivamente la corriente reactiva era aproximadamente 2.7 Amp.

Según el análisis anterior el valor del factor de potencia ó $\cos\varphi$ conociendo la corriente reactiva y el valor en cada instante de la corriente activa seria igual a:

$$\varphi = \left(\arctan\left(\frac{I_{ACT}}{I_{REACT}}\right) \right) \quad (4.5)$$

4.1.5 Determinación de la energía. El software creado determina la potencia demandada cada segundo y genera la grafica de esta contra el tiempo, así la energía consumida se determina mediante su sumatoria; en la figura 26 se ilustra la ventana del programa donde se muestra este comportamiento y se indica la energía consumida. Para proporcionar la energía en unidades de Kw.h se dividió por 3600.

4.3 CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

Para cuantificar la potencia que demanda el compresor y la energía consumida se utilizo el medidor eléctrico Simeas P de la empresa Siemens al cual se le estableció un método de calculo que tuviera en cuenta la componente fundamental y las componentes armónicas, el método de calculo utilizado fue el DIN.

4.2.1 Medición de la potencia. El Simeas P para la cuantificación de la potencia usa los siguientes parámetros de cálculo:

Potencia Activa

$$P = \sum_{n=1}^{21} (Va_n Ia_n + Vb_n Ib_n) \quad (4.6)$$

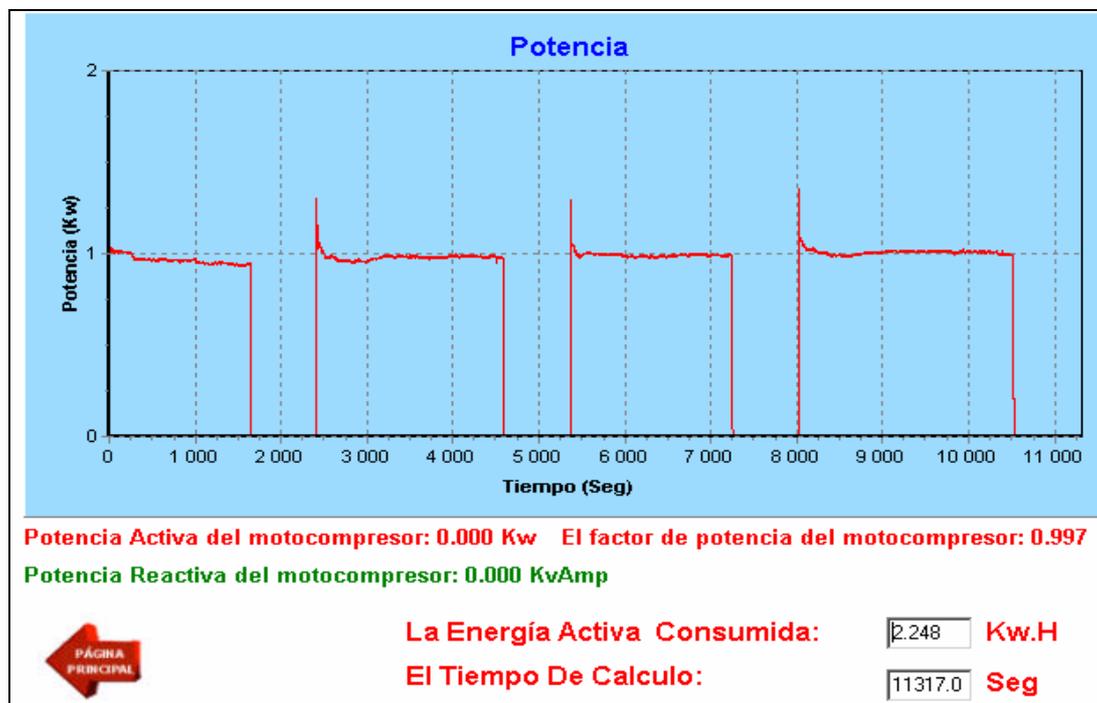


FIGURA 26 VENTANA DE POTENCIA Y CONSUMO DE ENERGIA DEL SOFTWARE DE CONTROL UTILIZANDO UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Potencia Reactiva

$$Q_{tot} = \sum_{n=1}^{2l} (Va_n Ia_n + Vb_n Ib_n) \quad (4.7)$$

Potencia Aparente

$$S = \sqrt{V_{1N}^2 + V_{2N}^2 + V_{3N}^2} * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2} \quad (4.8)$$

Factor de Potencia

$$\cos \varphi = \frac{|P|}{S_{DIN}} \quad (4.9)$$

4.2.2 Medición de la energía. El Simeas calcula la energía consumida por el equipo en Kw.h a cualquier frecuencia de funcionamiento teniendo en cuenta todas las componentes armónicas existentes basado en la sumatoria de la potencia en función del tiempo, este valor es entregado en el display del Simeas. Si se dispone del adaptador de protocolo RS485/RS232 los valores de energía así como de cualquier otra medición eléctrica pueden ser leídos por el sistema de adquisición de datos (ver figura 14).

5. RESPUESTA DEL SISTEMA A LA ACCION DE CONTROL ON-OFF

El objetivo principal de cualquier estrategia de control es el de mantener constante la temperatura de un producto que se necesita conservar, para poder realizar el control de esta temperatura por lo general se controla la temperatura del ambiente refrigerado (ambiente interior del cuarto frío), aunque esto no garantiza en absoluto que la temperatura del producto se mantenga dentro de los rangos estipulados, pero en la practica y por facilidad de implementación del sistema de control se aplica tradicionalmente.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

La estrategia de control on-off mantiene la temperatura de un producto en conservación dentro de un rango de temperatura cercano a la *temperatura de referencia* (temperatura del ambiente interior en la que se considera que el producto esta a la temperatura adecuada).

Esta estrategia regula la capacidad del sistema por medio de la conexión y desconexión de los equipos, para establecer el momento en que deben conectarse y desconectarse los equipos se implanta una diferencia de temperatura a la que debe variar la temperatura del ambiente interior del cuarto de conservación para que los equipos puedan ser encendidos ó nuevamente apagados (esto con el fin de disminuir el arranque frecuente y de reducir el desgaste del motocompresor), Si las temperaturas de conexión y desconexión se ajustan muy cercanas entre si (diferencia demasiado pequeña) el sistema presentara una tendencia a efectuar ciclos cortos de operación y descanso (arrancar y parar con demasiada frecuencia). La temperatura a la cual debe reducirse ó aumentarse la temperatura del ambiente interior para que los equipos sean apagados o encendidos dependerá en gran parte

de la forma como se lleve a cabo la acción de control en la estrategia y de la diferencia de temperatura establecida, las diferentes alternativas como se puede realizar la acción de control en la estrategia de control on-off se describe detalladamente en la sección 2 de este capítulo.

En la figura 27 se indica la manera como la estrategia de control on-off regula la capacidad del sistema por medio del control indirecto de la temperatura del producto, esto quiere decir que manteniendo la temperatura del ambiente interior dentro de un rango de temperatura adecuado dado por la temperatura de referencia y la diferencia de temperatura, se garantiza la permanencia de la temperatura del producto en un valor cercano a la temperatura de referencia.

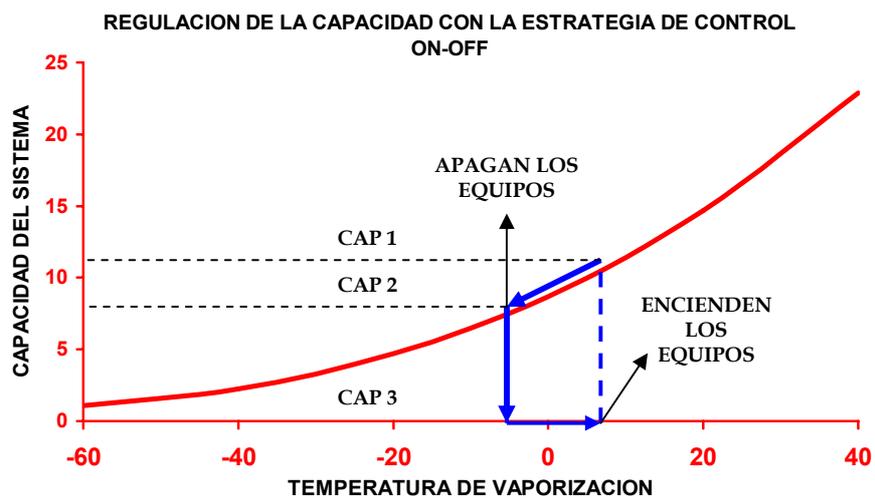


FIGURA 27 REGULACION DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA EN LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Si observamos la ecuación 1.5 al hacer las revoluciones del compresor igual a cero su capacidad también se hace igual a cero, si las revoluciones toman su valor máximo 1800 RPM la capacidad del sistema tomara diferentes valores dependiendo de la temperatura de saturación del refrigerante en que se encuentre.

$$CAP = \rho_v * \left(\left(\frac{\pi * D^2}{4} * L \right) * RPM * N \right) * \epsilon_T * (h_2 - h_1) \quad (1.5)$$

Si $RPM = 0$

$CAP = 0$

Con la estrategia de control On-Off no se logra mantener la temperatura del producto igual a la temperatura de referencia, la temperatura a la que el producto permanece será una temperatura de equilibrio cercana a la temperatura de referencia (ver figura 28), la temperatura del producto estará cambiando continuamente dentro de un rango alrededor de esta temperatura dependiendo de las condiciones en que se este llevando la refrigeración como la diferencia de temperatura, la temperatura de referencia, las perturbaciones sobre el sistema, cantidad de producto a conservar y en gran parte de la temperatura ambiental externa, debido a esto la temperatura del producto con la estrategia de control on-off se dice que no permanece constante y depende de las condiciones en que se este llevando el proceso de refrigeración.

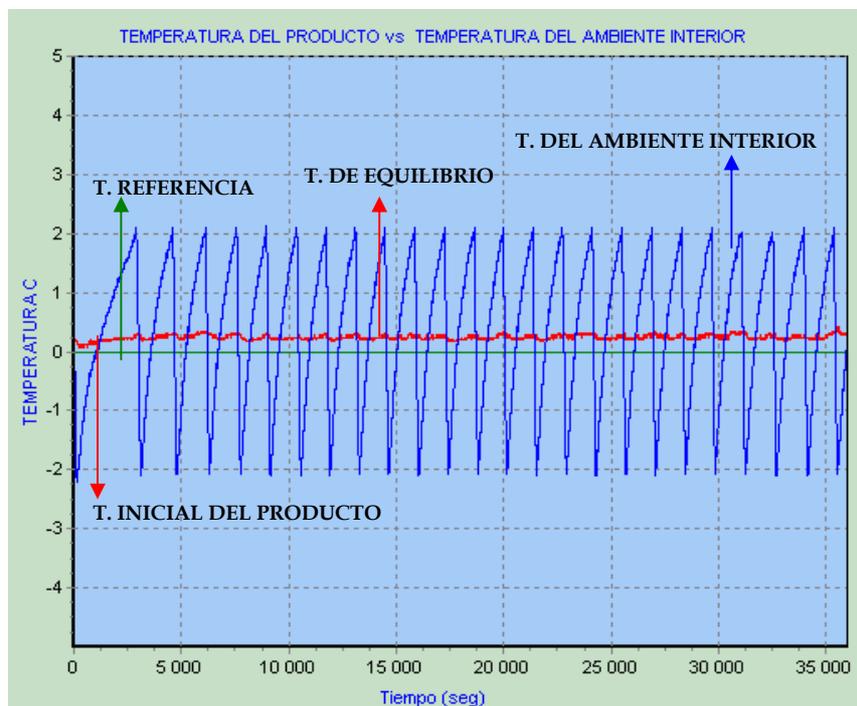


FIGURA 28 TEMPERATURA DE CONSERVACION DEL PRODUCTO CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

5.2 DIFERENTES ALTERNATIVAS DE REALIZAR LA ACCIÓN DE CONTROL EN LA ESTRATEGIA ON-OFF

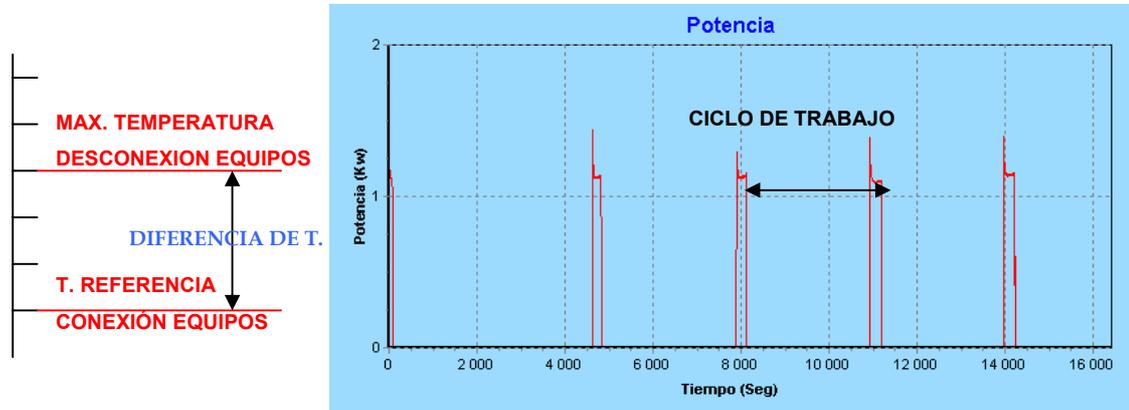


FIGURA 29 CONTROL ON-OFF TRADICIONAL

Una manera de realizar la estrategia de control on-off es por el método tradicional, este desactiva los equipos del sistema de refrigeración cuando la temperatura controlada se reduce a la temperatura de referencia, y activa los equipos cuando la temperatura controlada es igual a la temperatura de referencia mas una diferencia de temperatura, el tiempo que gasta en pasar la temperatura de control de la temperatura de referencia a la temperatura máxima permitida y regresar a la temperatura de referencia se conoce como un *ciclo* en el control On-Off (en la figura 29 se ilustra una estrategia de control on-off tradicional).

Al estudiar el comportamiento de la temperatura del producto con la estrategia de control On-Off tradicional se observó que la temperatura del ambiente refrigerado permanece siempre por encima de la temperatura de referencia, situación que ocasiona que la temperatura del producto aumente con el tiempo muy por encima de la temperatura de referencia hasta encontrar una temperatura de equilibrio. Con la estrategia de control On-Off tradicional el rango en el que se mueve la temperatura del producto es bastante amplio, y debido a la gran dependencia que tiene cualquier estrategia de control con la temperatura ambiental externa y a la

gran variación de esta durante el transcurso del día, la temperatura del producto variara continuamente.

Con el objeto de encontrar el mejor comportamiento utilizando el método de control On-Off se estudiaron varias alternativas de llevar a cabo la acción de control en esta estrategia:

- Diferencia de temperatura (+). Variando la temperatura controlada solo por arriba de la temperatura de referencia (utilizando la estrategia de control On-Off tradicional).
- Diferencia de temperatura (-) con y sin control de la temperatura del producto. Apagando los equipos cuando la temperatura del ambiente refrigerado descendiera hasta la temperatura de referencia menos el diferencial de temperatura, así el ambiente refrigerado permanecería todo el tiempo por debajo de la temperatura de referencia, y prendiéndolos cuando la temperatura ascendiera hasta la referencia, el comportamiento no fue satisfactorio ya que se presento una gran variación de la temperatura del producto y esta descendió demasiado, por debajo de la temperatura de referencia. Para prevenir que la temperatura del producto descendiera mas allá de la temperatura de referencia, al llegar a la temperatura de referencia los equipos se apagaban y solo se reanudaría el arranque si la temperatura del producto se encontraba por encima de la temperatura de referencia, esto ocasiono un continuo proceso de arranque y parada de los equipos, con el fin de evitar esta situación se estableció un diferencial de temperatura del producto al igual como se había echo con la temperatura del ambiente interior del cuarto. Esto genero una variación aun mayor de la temperatura del producto y un aumento en el consumo de energía (ver comportamiento en la figura 30).

- Acción combinada. Con el propósito de mejorar el comportamiento de la temperatura del producto utilizando una estrategia de control On-Off y reducir el costo de la energía, se implemento un método combinado entre los dos anteriores (ver figura 31), variando la temperatura del ambiente interior por arriba y por debajo de la temperatura de referencia, estrategia que arrojo los mejores resultados de ahorro de energía y de disminución de la variación de la temperatura del producto.

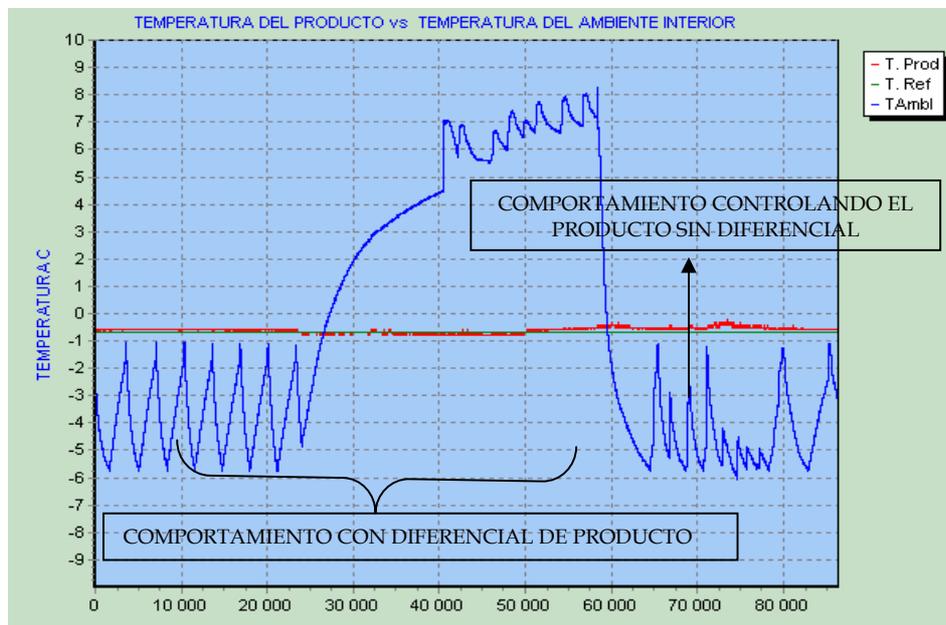


FIGURA 30 COMPORTAMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF MANTENIENDO LA TEMPERATURA DEL AMBIENTE REFRIGERADO SIEMPRE POR DEBAJO DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA Y CONTROLANDO TAMBIEN LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO

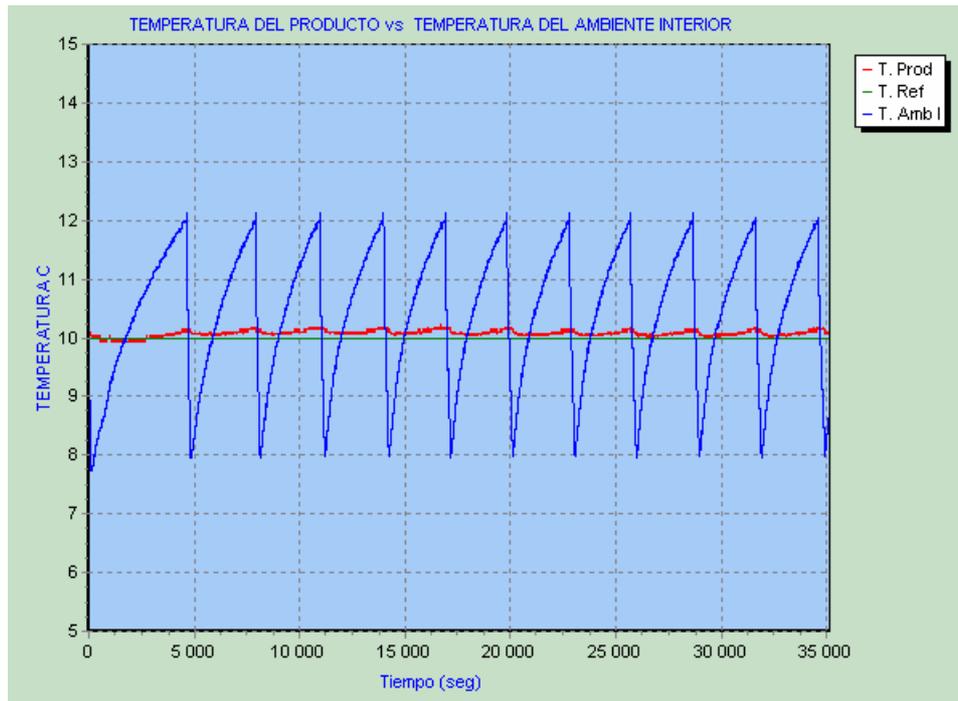


FIGURA 31 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO(ROJA) Y LA TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR (AZUL) CON CONTROL ON-OFF VARIANDO LA TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR POR ENCIMA Y POR DEBAJO DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA UNA DIFERENCIA DE 2 °C. PARA UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE 10°C

Debido a las razones mencionadas anteriormente el estudio de la estrategia de control On-Off se llevo a cabo con la estrategia de control On-Off combinada.

5.3 COMO SE REALIZA LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

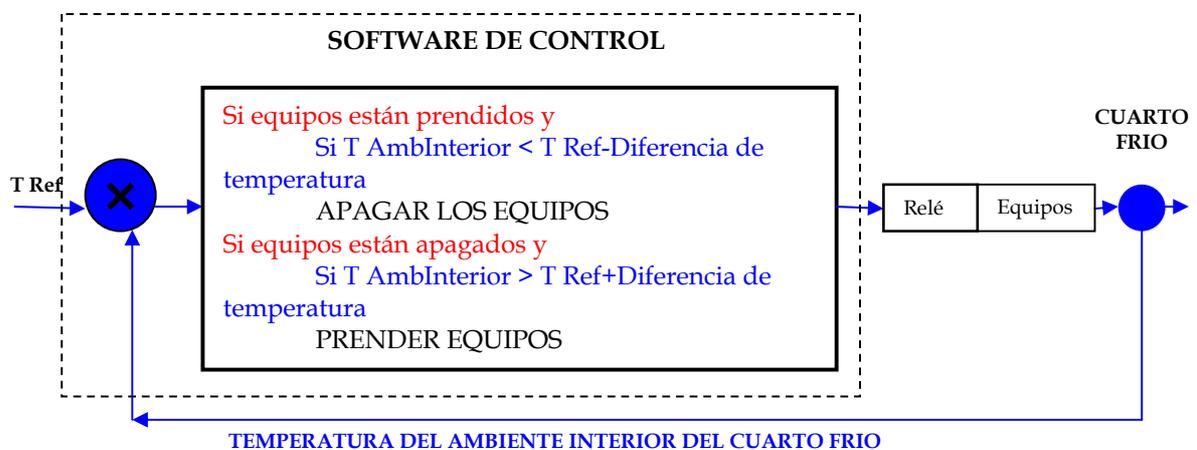


FIGURA 32 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

La estrategia de control on-off es un sistema de lazo cerrado (ver figura 32), que relaciona el valor de la temperatura del ambiente interior del cuarto de conservación (temperatura controlada) y la diferencia de temperatura con la temperatura de referencia para producir una acción de control que acciona o detiene los equipos.

5.4 RESPUESTA DINÁMICA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Con el fin de hacer un análisis comparativo entre las razones por las cuales una estrategia es mejor que la otra (capítulo 7-8) se estudio el comportamiento de las temperaturas tanto del ambiente interior como las del refrigerante mientras los equipos permanecen encendidos o apagados.

5.4.1 Comportamiento general del sistema.

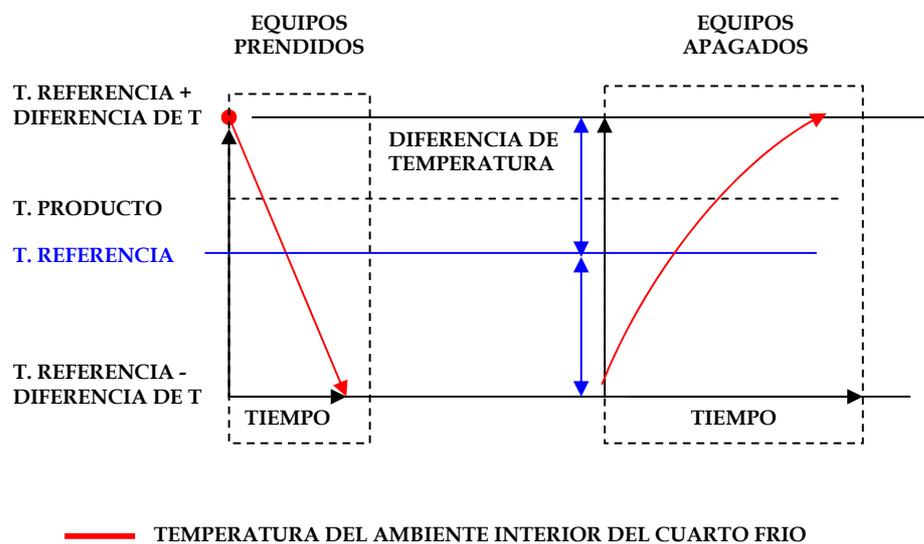


FIGURA 33 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR DEL CUARTO FRIO CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

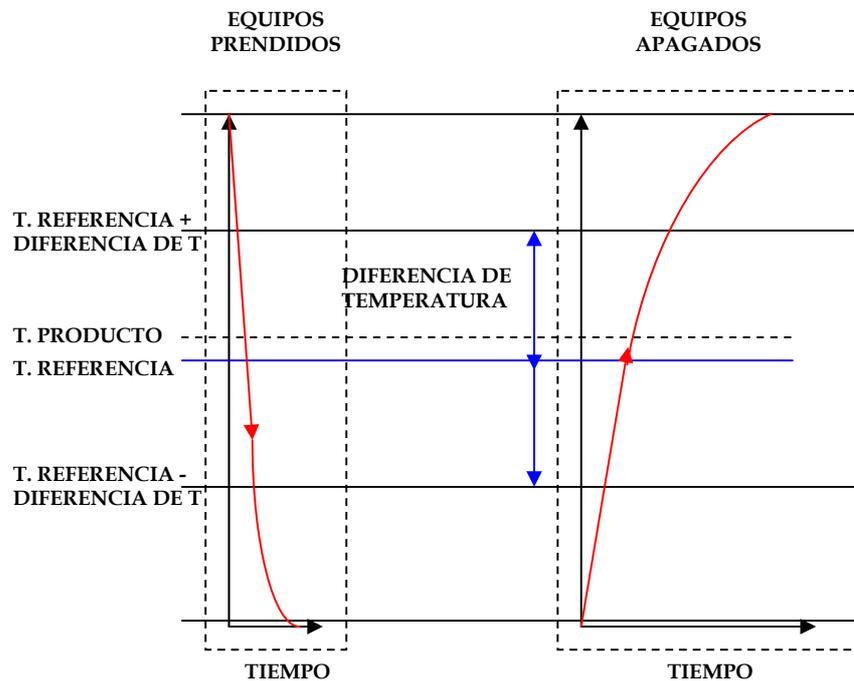
La temperatura del ambiente interior del cuarto de conservación se mantiene dentro del rango de temperaturas que le imponga la diferencia de temperatura con la que se este realizando la estrategia, y su comportamiento dependerá de la condiciones en que se este realizando el proceso de refrigeración y del estado de los equipos (encendidos o apagados) en la figura 33 se ilustra este comportamiento.

En la figura 33 se puede observar que la temperatura del ambiente interior presenta un estado transitorio (la temperatura del ambiente interior y del refrigerante en los puntos del sistema van cambiando en la medida que se va llevando a cabo la refrigeración) mientras los equipos están encendidos, igualmente cuando los equipos están apagados.

Debido a esto para poder comparar la temperatura del ambiente interior de esta estrategia con la temperatura que resulta al utilizar otras estrategias se ha estipulado una temperatura del ambiente interior promedio cuando los equipos están prendidos y otra temperatura cuando están apagados para cada caso en particular.

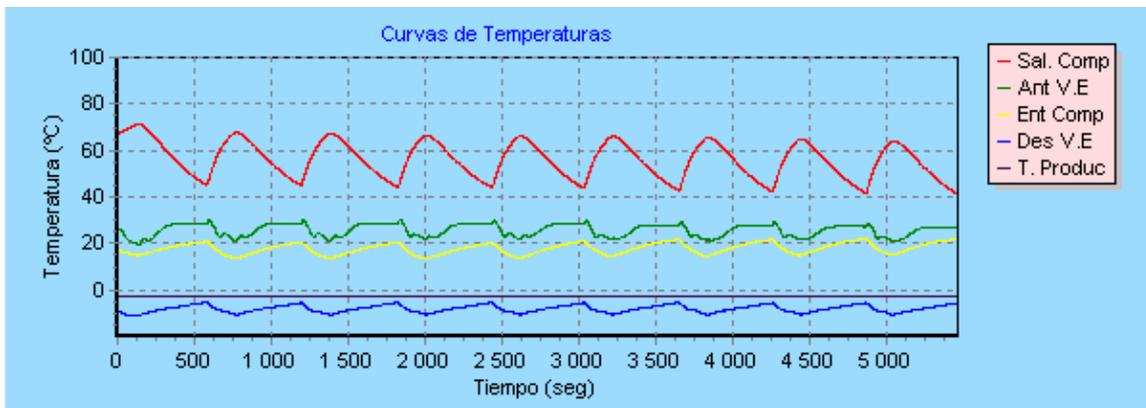
El mismo estado transitorio de la temperatura ambiente interior se presenta en la temperatura de saturación del refrigerante pero de una manera mas marcada, la figura 34 ilustra su comportamiento. Igual que en el caso anterior para poder tener un valor de la temperatura de saturación con el cual se puedan hacer cálculos como el rendimiento del sistema (COP) se establece una temperatura de saturación promedio.

Estas variaciones en la temperatura del refrigerante al prenderse y apagarse los equipos se presentan en todos los puntos del ciclo de refrigeración donde el refrigerante sufre cambio alguno, en la figura 35 se ilustra este hecho.



— TEMPERATURA DE SATURACION DEL REFRIGERANTE

FIGURA 34 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE SATURACION DEL REFRIGERANTE EN LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF



— Sal. Comp
— Ant V.E
— Ent Comp
— Des V.E
— T. Produc

Sal. Comp = Temperatura a la salida del compresor	Des V.E = Temperatura después de la válvula de expansión
Ant. V.E = Temperatura antes de la válvula de expansión	T. Produc = Temperatura del producto refrigerado
Ent. Comp = Temperatura a la entrada del compresor	

FIGURA 35 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE EN LOS PUNTOS DEL CICLO DE REFRIGERACION DONDE EXISTE CAMBIO ALGUNO EN SUS PROPIEDADES PARA UNA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C, DIFERENCIA DE TEMPERATURA 1°C Y SIN PERTURBACIONES AL UTILIZARSE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Estos comportamientos dependen exclusivamente del tiempo que duren los equipos prendidos y apagados los equipos, es decir de la duración del ciclo; lo que quiere decir que cambiarán según: la carga con que se encuentre el sistema de refrigeración, la temperatura de referencia, la temperatura ambiental exterior y las perturbaciones a que este sometido el sistema.

5.4.2 Con relación a la carga. Cuando se tiene una gran cantidad de producto por conservar se dice que el sistema tiene una condición de carga alta, esa condición genera un comportamiento característico en el sistema.

Cuando se tiene carga alta el tiempo que tienen que permanecen prendidos los equipos es mayor que cuando se tiene una condición de carga baja (ver figuras 36 y 37), igualmente el tiempo que permanecen apagados (como se demuestra en el capítulo 8 ecuaciones 8.4-8.6). Esto ocasiona que la temperatura del ambiente interior y la temperatura de saturación del refrigerante promedio cuando los equipos están encendidos sea menor cuando se tiene una condición de carga alta que cuando se tiene una condición de carga baja (en la figura 38 y 39 se ilustra el comportamiento real de estos hechos).

En las figuras 36 y 37 es notable que con una condición de carga alta se presenta una menor frecuencia de arranques y paradas de los equipos que cuando se tiene una condición de carga baja, lo cual resulta favorable para la vida de los equipos.

En las siguientes figuras (38 y 39) se muestra también el comportamiento de la temperatura del producto con las dos condiciones de carga, en la condición de carga baja la temperatura de equilibrio del producto es mayor que cuando se tiene carga alta debido a el aumento de la temperatura ambiental interior promedio cuando los equipos están prendidos para esta condición.

Cuando los equipos están prendidos el producto esta sometido a un estado de convección forzada durante un tiempo mayor a una temperatura del ambiente interior mucho menor cuando se tiene carga alta que cuando se tiene carga baja, lo

que favorece la disminución de la temperatura de equilibrio del producto para la condición de carga alta.

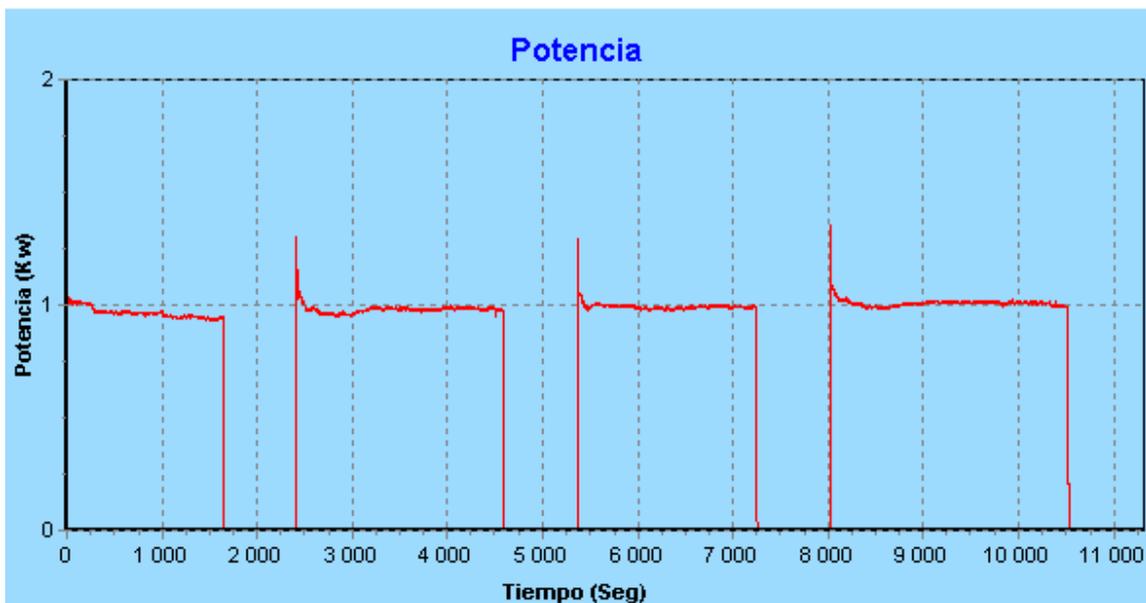


FIGURA 36 TIEMPO DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS EQUIPOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 2°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

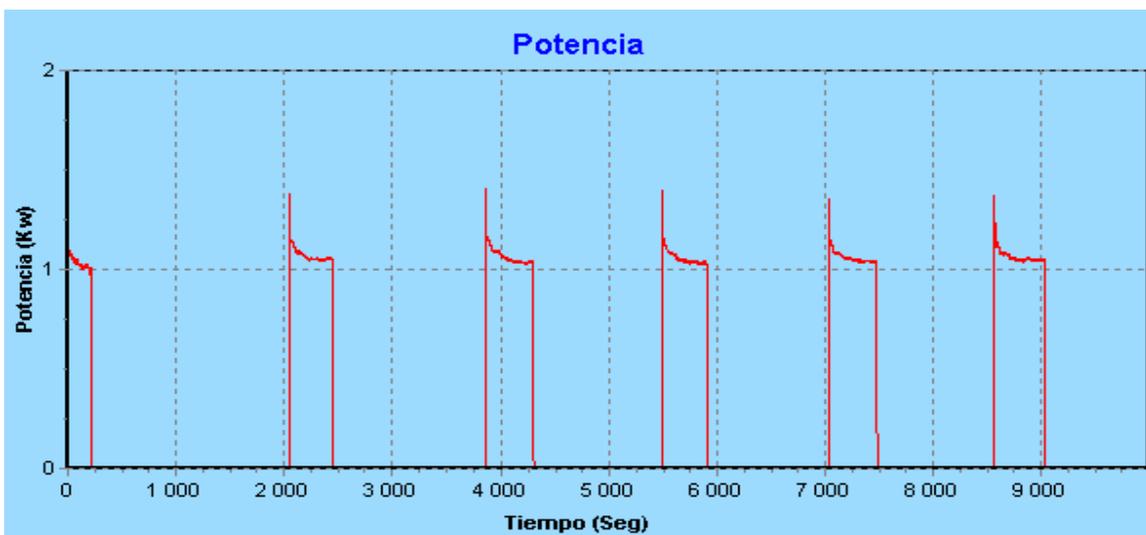


FIGURA 37 TIEMPO DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS EQUIPOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 2°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

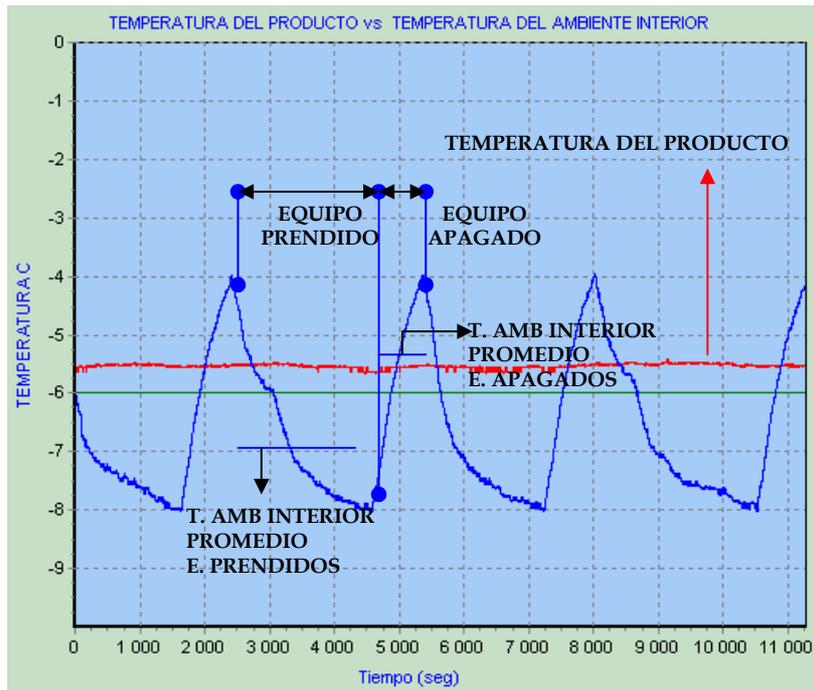


FIGURA 38 TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR PROMEDIO CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 2°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

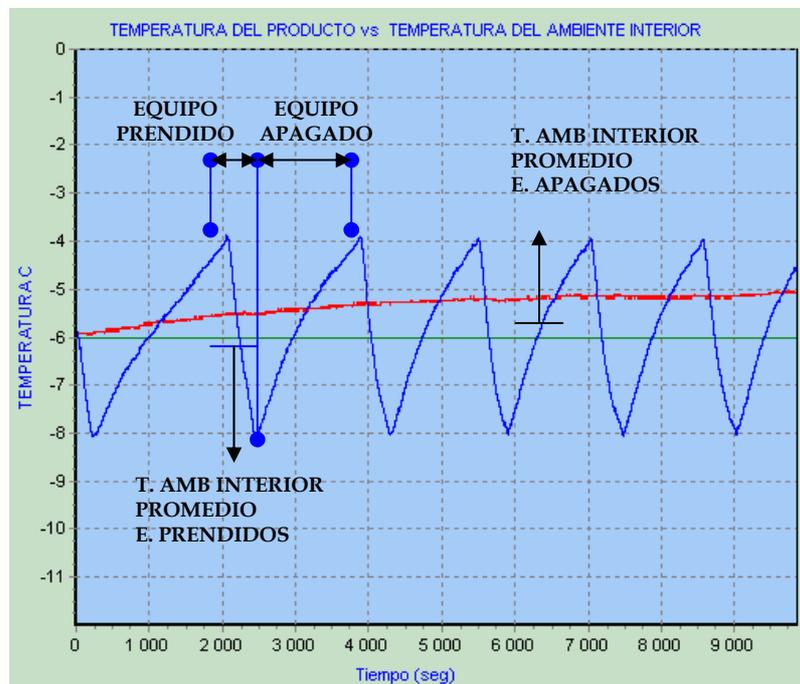


FIGURA 39 TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR PROMEDIO CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 2°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

Si bien es cierto la temperatura ambiental promedio cuando los equipos están apagados es menor en la condición de carga baja que en la condición de carga alta, cuando los equipos están apagados el producto solo esta bajo convección natural y la transferencia de calor es menor en este caso.

5.4.3 Como función de la temperatura ambiental exterior. En el transcurso del día la carga térmica sobre el sistema de refrigeración cambia debido a la variación de la temperatura ambiental exterior, comportamiento que es ocasionado por las diversas condiciones climáticas que se pueden presentar, la estrategia de control y las temperaturas del ciclo de refrigeración actuaran de una manera diferente con cada temperatura ambiental exterior. Como es normal en un sistema de refrigeración en estado transitorio al aumentarse la temperatura exterior es mas difícil la condensación del refrigerante lo cual ocasiona que se produzca un menor efecto refrigerante, y la elevación de esa temperatura hace que se aumente la presión de descarga del compresor; estos dos hechos hacen que el consumo de energía se aumente.

La estrategia de control también se adapta a esta situación, con el aumento de la temperatura ambiental exterior la duración del tiempo que el equipo esta encendido se aumenta, debido a que el sistema tiene que sacar una mayor cantidad de calor del ambiente interior para que la temperatura ambiental interior llegue al valor donde los equipos deben ser desconectados, y el tiempo de descanso de los equipos se reduce debido a que la transferencia de calor se aumenta y se calentara mas rápido el cuarto de conservación. La respuesta de la estrategia a esta situación es aumentar los ciclos de encendido y apagado.

Al aumentarse el tiempo de encendido, disminuirse el tiempo que permanecen apagados los equipos del sistema de refrigeración y aumentarse los ciclos de operación, la temperatura del ambiente interior promedio disminuirá, esto

favorece el enfriamiento del producto por las mismas razones dadas cuando se tenía una condición de carga alta.

5.4.4 Con respecto a la temperatura de referencia. Cuando se reduce la temperatura de referencia la transferencia de calor entre el ambiente exterior y el ambiente interior se mejora, luego el calor que ingresa por las paredes del cuarto de conservación se aumenta y ocasiona que la carga térmica sobre el sistema se incremente, la respuesta de la estrategia es aumentando los ciclos de operación e igual que en el caso anterior el tiempo que deberán permanecer los equipos encendidos se incrementa y en descanso se reduce (en las figuras 40 y 41 se presenta este hecho).

5.4.5 Con relación a las perturbaciones a las que se somete el sistema. Cuando el ambiente interior es sometido a perturbaciones repentinas ocasionadas por las condiciones del trabajo en donde se encuentre el equipo de refrigeración la estrategia de control responderá de igual manera que en las condiciones anteriores, si la perturbación se realiza mientras los equipos están prendidos estos van a permanecer encendidos un mayor tiempo y si se realiza cuando están apagados el tiempo de descanso de los equipos se reduce (ver figuras 42 y 43).

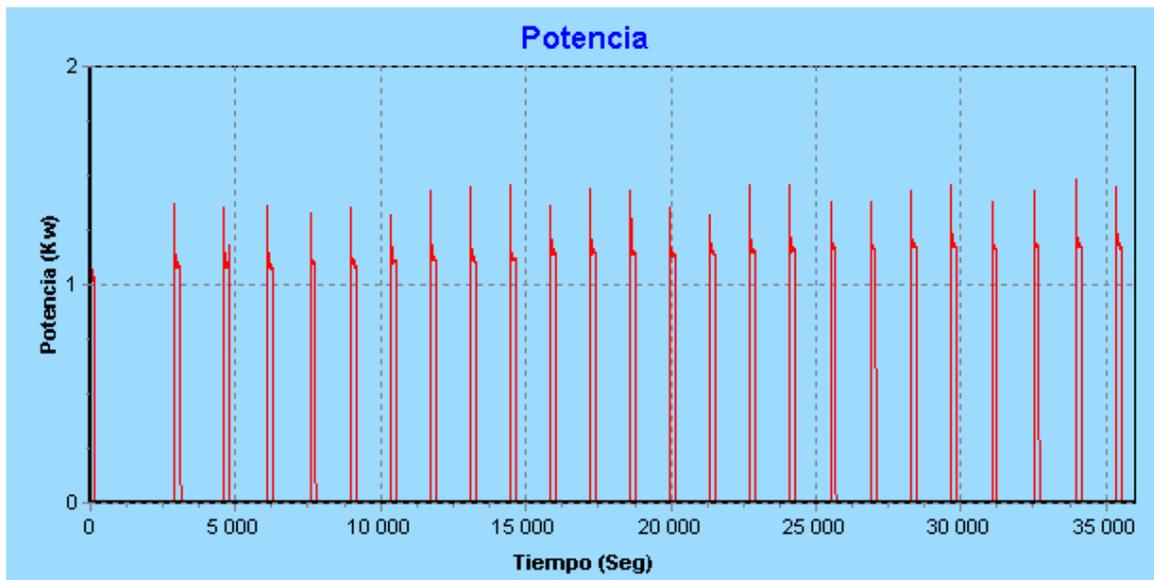


FIGURA 40 TIEMPO DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS EQUIPOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA 0°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 2°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

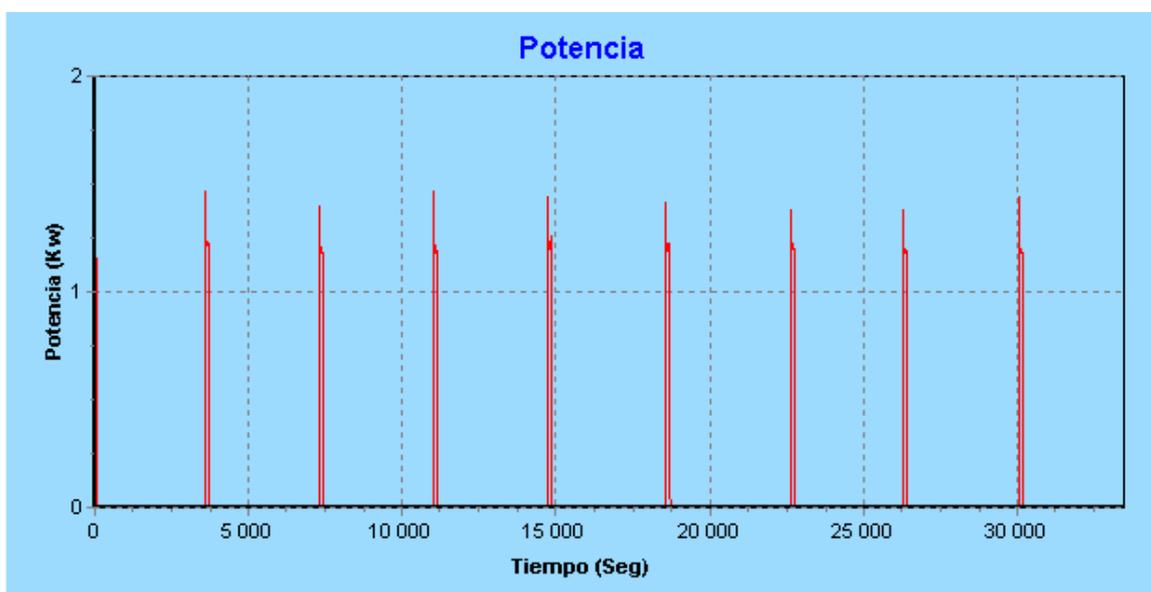


FIGURA 41 TIEMPO DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS EQUIPOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA 10°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 2°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

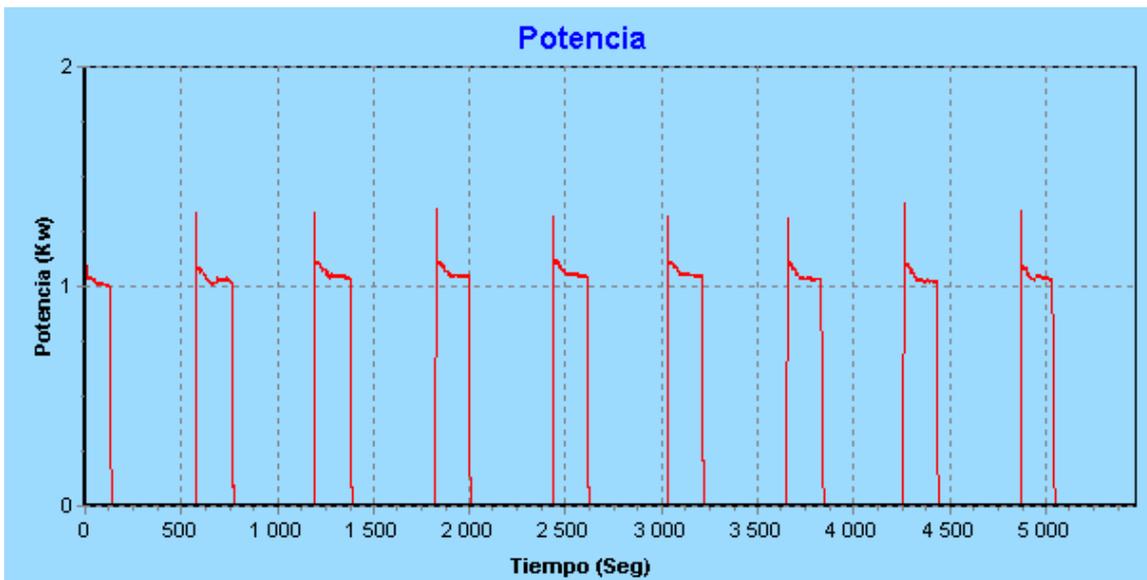


FIGURA 42 TIEMPO DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS EQUIPOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 1°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

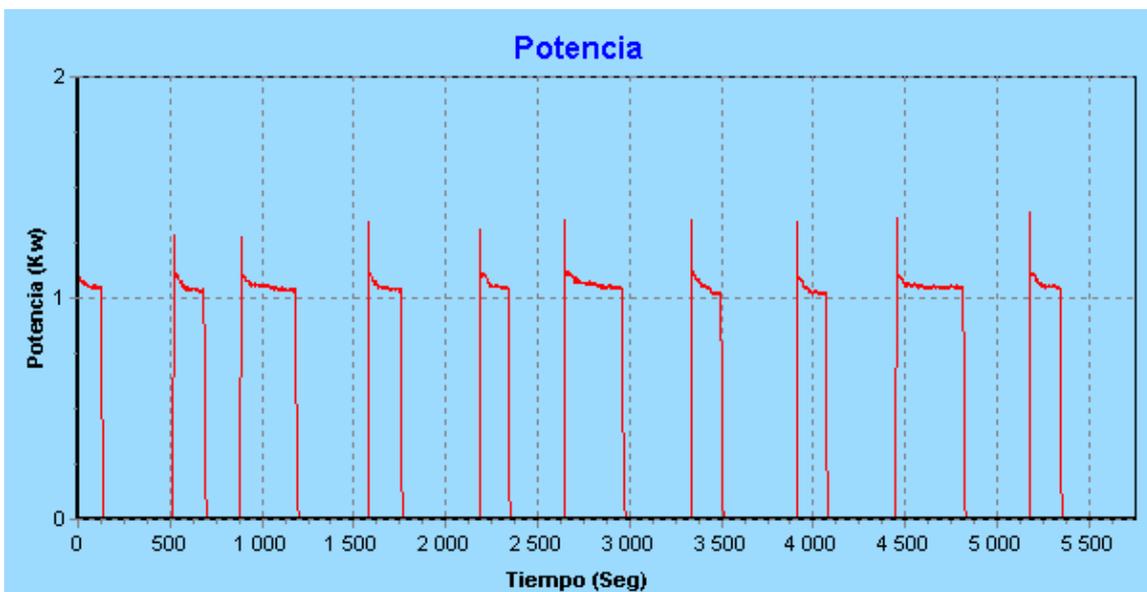


FIGURA 43 TIEMPO DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS EQUIPOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 1°C CON PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

La temperatura del ambiente interior con el aumento de las perturbaciones se comporta como se muestra en las siguientes figuras (44 y 45), en este caso las perturbaciones hechas al sistema no son muy marcadas y la temperatura del

producto no sufrió cambio alguno al perturbar el ambiente interior debido a que la duración de las mismas no fue demasiado y la regularidad con la que se hacían no fue muy grande luego el sistema se recupero rápidamente, si las perturbaciones son muy frecuentes y su duración bastante prolongada el sistema deberá permanecer prendido la mayor parte del tiempo y no seria necesaria la implementación de ninguna estrategia de control.

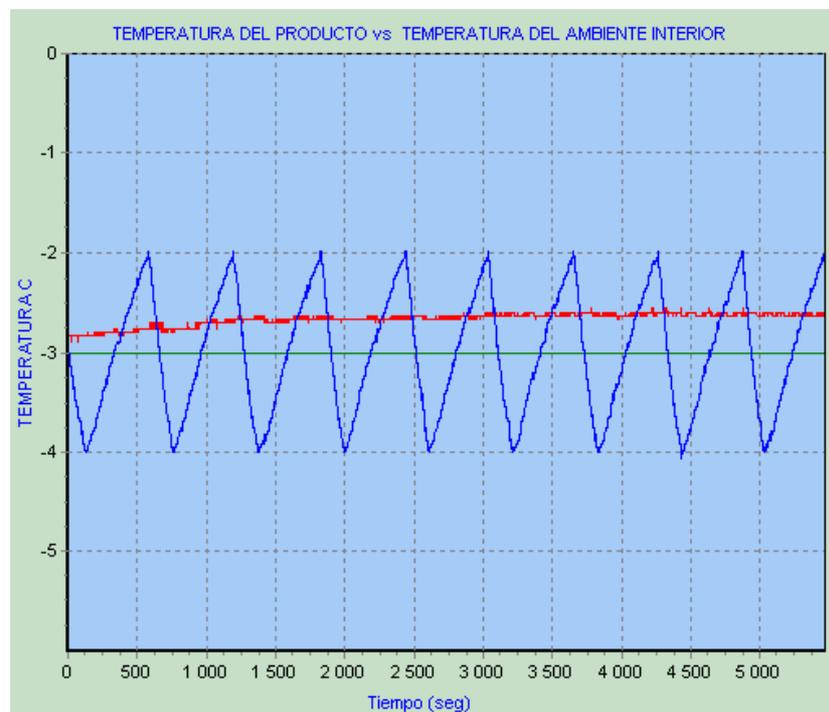


FIGURA 44 TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR Y DEL PRODUCTO EN CONSERVACION CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 1°C SIN PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

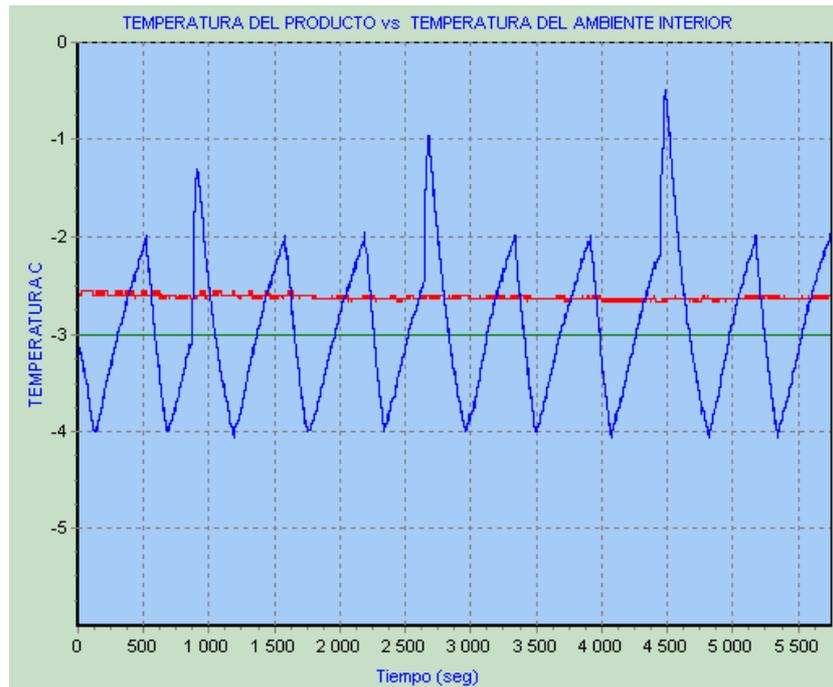


FIGURA 45 TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR Y DEL PRODUCTO EN CONSERVACION CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA LA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA 1°C CON PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR

5.5 CONSUMO DE ENERGÍA CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

En la tabla 2 y 3 se muestran los valores del consumo de energía cuando se utiliza una estrategia de control on-off para cada escenario planteado sin perturbaciones y con perturbaciones al ambiente interior.

Tabla 2. Consumo de energía sin perturbaciones.

CONSUMO EN Kwh/10 horas SIN PERTURBACIONES				
T. Referencia	DIF=1 CA SP	DIF=2 CA SP	DIF=1 CB SP	DIF=2 CB SP
-6	8.55	7.15	3.3	2.93
-3	3.74	3.54	2.53	2.28
0	1.763	1.405	1.5746	1.32
5	1.4152	1.02	1.05	0.962
10	0.608	0.594	0.7037	0.6421

Tabla 3. Consumo de energía con perturbaciones

CONSUMO EN KWh/10 horas CON PERTURBACIONES				
T. Referencia	DIF=1 CA CP	DIF=2 CA CP	DIF=1 CB CP	DIF=2 CB CP
-6	10	10	4.44	4.31
-3	4.24	4.76	3.205	3
0	1.978	1.8746	1.97	1.704
5	1.5362	1.2159	1.1862	1.1753
10	0.6818	0.8615	0.684	0.769

Las figuras 46 y 47 indican la tendencia presentada en el consumo de energía con cada uno de los escenarios planteados. A pesar de la disminución del trabajo de compresión al disminuir la temperatura de referencia para un compresor con revoluciones constantes, la energía (potencia por unidad de tiempo) consumida aumenta con la reducción de la temperatura de referencia. El incremento en la energía se debe al aumento de la transferencia de calor que ocurre entre el ambiente exterior y el interior, producto de una diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el ambiente exterior mucho mayor lo que origina que el tiempo que deban permanecer encendidos los equipos sea mayor y un tiempo de descanso menor.

De la observación de las gráficas del consumo de energía se concluye que entre menor sea la diferencia de temperaturas a las que se mantiene el ambiente refrigerado mayor será el consumo de energía (debido a un incremento en los ciclos de operación y descanso de los equipos lo que causa un aumento en las pérdidas de energía por transitoriedad del sistema durante los periodos de arranque-parada).

Las líneas de tendencia para varios valores de diferencia de temperatura de encendido y apagado son paralelas entre si y siguen el mismo comportamiento.

La tendencia del consumo de energía es lineal para bajas cantidades de producto refrigerado, en la medida que se aumenta la cantidad de producto la pendiente de la línea crece hasta que la grafica toma una característica de tipo exponencial.

Cuando el ambiente refrigerado es sometido a perturbaciones periódicas las pendientes de las líneas de tendencia del consumo de energía aumentan proporcionalmente con la intensidad con la que se estén llevando a cabo.

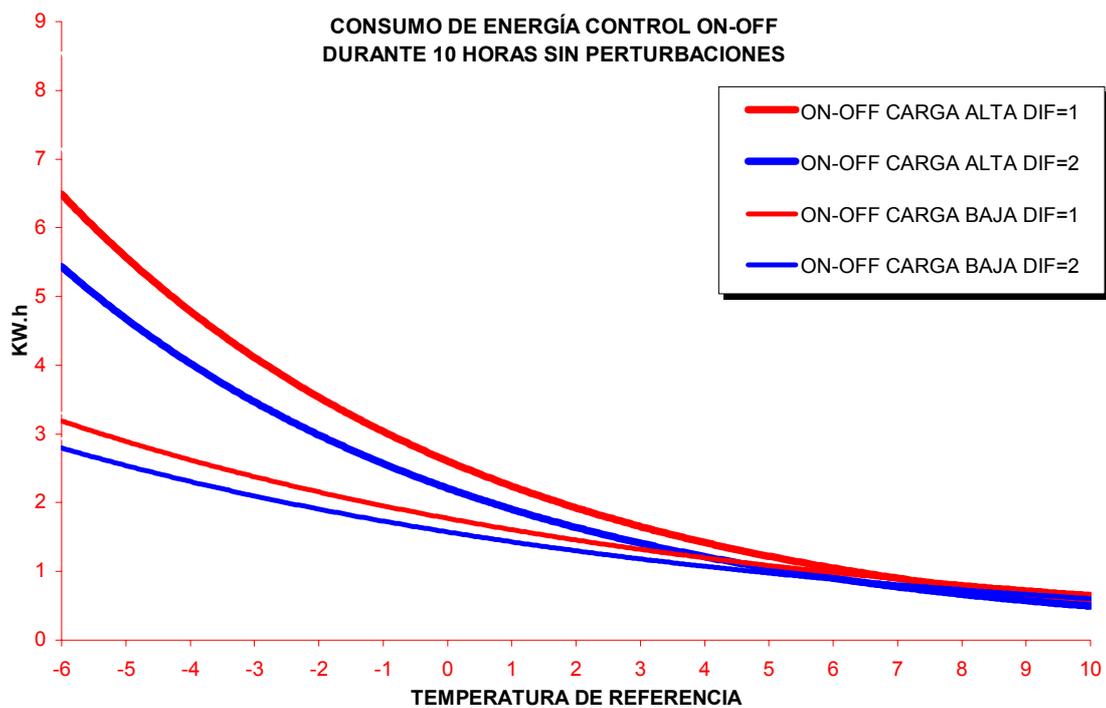


FIGURA 46 CONSUMO DE ENERGIA PARA UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF SIN PERTURBACIONES

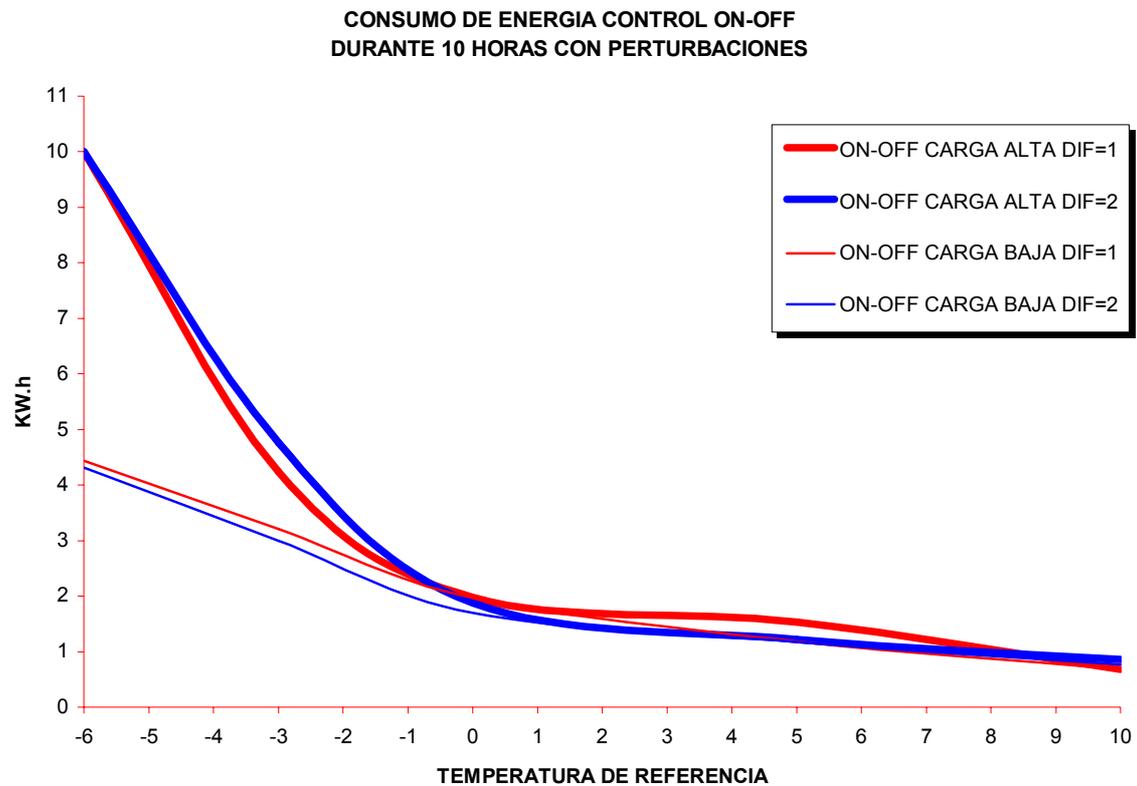


FIGURA 47 CONSUMO DE ENERGIA PARA UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF CON PERTURBACIONES

5.6 INCONVENIENTES DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF.

1. No se logra mantener la temperatura del producto igual a la temperatura de referencia, la temperatura a la que el producto permanece será una temperatura de equilibrio variable cercana a la temperatura de referencia y esta temperatura cambiará dependiendo de las condiciones climáticas en que se lleve a cabo el proceso de refrigeración.

2. Oscilación de la temperatura de conservación del producto: uno de los inconvenientes de la estrategia de control on-off es la oscilación de la temperatura en la que permanece el producto, debido a la forma como tiene que regular esta estrategia el control de la capacidad del sistema, aunque estas oscilaciones son de

muy poca amplitud y pueden confundirse con la oscilación del elemento de medición, en algunos casos estas oscilaciones son mas marcadas que en otros.

Las principales causas que ocasionan el aumento en la frecuencia de la oscilación o en la amplitud de estas en la temperatura del producto son:

- Una gran cantidad de producto a conservar genera una mayor inercia térmica, ya que esta es una consecuencia del retardo en la propagación del calor en el interior del producto ocasiona que su temperatura varíe con los ciclos de operación y descanso que realice el equipo.
- Una menor temperatura de referencia, un aumento en las perturbaciones o un aumento en la temperatura ambiental exterior incrementa los ciclos de operación, lo cual ocasiona que la temperatura del producto oscile alrededor de su temperatura de equilibrio con la misma frecuencia con la que se prenden o apagan los equipos.
- El aumento en la diferencia de la temperatura de conexión y desconexión produce un aumento en la amplitud de la oscilación del producto aunque una disminución de la frecuencia con la que oscila.

3. Disminución de la eficiencia energética del sistema: a mayores velocidades del compresor se tienen menores valores de eficiencia volumétrica y mecánica es decir la eficiencia total del sistema se reduce, se presenta además otra serie de inconvenientes como es la disminución de la eficiencia energética del sistema. Murphy y Goldschmidt (1985) estudiaron los efectos durante el arranque y la parada de unidades de acondicionamiento residenciales que operaban con control On-Off. Los autores mostraron que gran parte de la pérdida de eficiencia de estas unidades esta asociada a la transitoriedad del sistema durante los periodos de arranque-parada promovidos por el sistema de control. La dinámica del refrigerante durante el arranque del sistema es la responsable por la demora de

este en alcanzar el régimen permanente degradando la eficiencia del sistema. Esta fuente de pérdida asociada a la desconexión del sistema es debida a la migración del refrigerante del condensador hacia el evaporador. Inmediatamente después que el sistema se apaga la mayor parte del refrigerante se encuentra en el condensador o en la línea de líquido, a una presión elevada, con el transcurso del tiempo el refrigerante buscará un estado de equilibrio mecánico migrando hacia el evaporador de manera que se igualen las presiones y las temperaturas del sistema (ver figura 48).

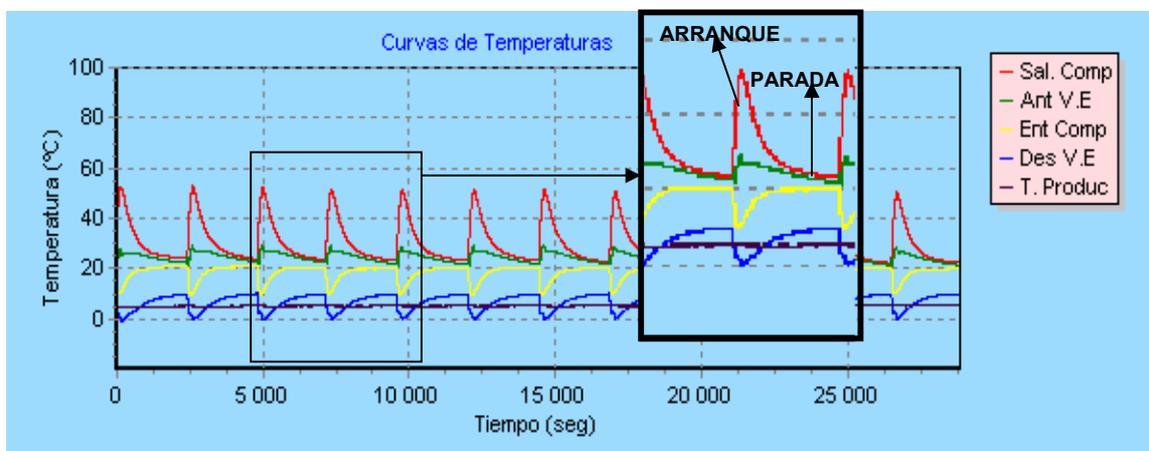


FIGURA 48 DINAMICA DEL REFRIGERANTE DURANTE LOS PERIODOS DE ARRANQUE Y PARADA PARA UNA TEMPERATURA DE CONSERVACIÓN DEL PRODUCTO DE 5 °C

5. Al utilizar esta estrategia de control se presenta un mayor consumo de energía comparado con la estrategia de control continuo.
4. Desgaste del motor del compresor: el continuo arranque de los motores incrementa el desgaste en correas de transmisión y rodamientos, mientras que el sobrecalentamiento debido a las elevadas corrientes de arranque (Todos los motores eléctricos para arrancar consumen un excedente de corriente, mayor que su corriente nominal, que es aproximadamente de dos a ocho veces superior) acorta la vida del sistema de aislamiento del motor, razones por las cuales se acorta considerablemente la vida del equipo.

6. RESPUESTA DEL SISTEMA A LA ACCION DE CONTROL CONTINUO

La conservación de productos sujetos a deterioro, particularmente alimentos es una de las necesidades más comunes de las poblaciones urbanas modernas y el único medio de conservarlos en su estado original es por refrigeración. Con el propósito de garantizar la calidad del producto y conservarlo en condiciones óptimas para su preservación es indispensable mantenerlo a la temperatura de conservación apropiada y que esta permanezca constante durante la mayor parte del tiempo, la magnitud de la variación permisible de su temperatura de conservación depende del tipo de producto en particular. Existen productos como los medicamentos y las sustancias químicas que requieren un tratamiento especial de conservación para evitar su reacción química y necesitan que su temperatura permanezca constante durante todo el tiempo. Teniendo en cuenta que la temperatura a la que se mantiene un producto refrigerado esta sujeta a cambios inesperados como resultado de perturbaciones al ambiente interior del cuarto de conservación como la abertura de las puertas y al continuo cambio de la carga térmica sobre el sistema debido a la variación de la temperatura ambiental exterior originado por las diferentes condiciones climáticas a la que se puede tener lugar, se requieren estrategias de control que ajusten la capacidad del sistema a la carga térmica impuesta en cualquier momento por las condiciones en que se lleve a cabo la refrigeración (como se muestra en la figura 49).

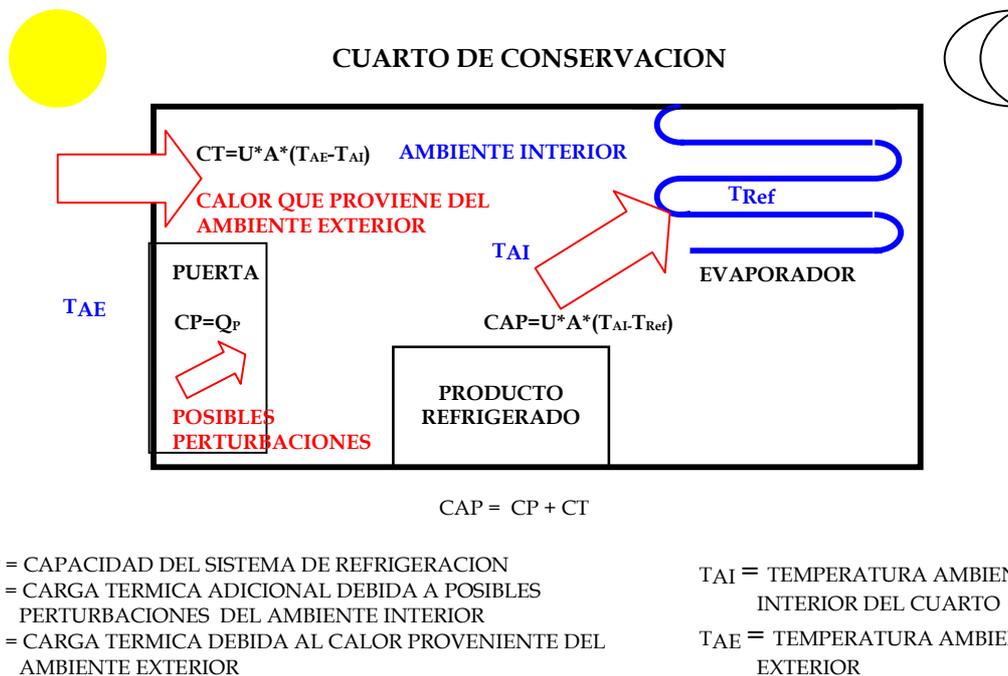


FIGURA 49 COMPONENTES DEL BALANCE DE ENERGIA EN UN CUARTO DE CONSERVACION

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUÓ

Una estrategia de control continuo con el objeto de mantener la temperatura del ambiente interior constante e igual a la temperatura de referencia adapta la capacidad del sistema de refrigeración a la carga térmica impuesta cada momento, cambiando la masa de refrigerante que circula por unidad de tiempo por medio de la regulación de las revoluciones del compresor.

6.1.1 Respuesta de la estrategia al mantener una temperatura de referencia constante. Debido a que la temperatura del ambiente interior permanece siempre constante debido a la acción de control de la estrategia, con el paso del tiempo se presentara un estado de equilibrio térmico entre el ambiente interior y el producto en conservación y las temperaturas del ambiente interior y del producto conservado se igualaran. Después de alcanzado este estado la estrategia de control

continuo aumentara o disminuirá las revoluciones del compresor dependiendo de la carga térmica en que se encuentre para que el calor que sale del ambiente interior en el evaporador sea igual al calor que se filtra a través de las paredes aisladas más el de todas las fuentes de calor presentes. La figura 50 muestra la manera como la estrategia de control adapta la capacidad del sistema de refrigeración para mantener la temperatura de referencia constante desplazando el punto de operación del sistema a través de una línea vertical adoptando el tamaño del compresor necesario para la carga térmica existente.

6.1.2 Respuesta de la estrategia ante una condición de capacidad del sistema constante. En la medida en que se aumenta la temperatura referencia requerida, la temperatura de saturación del refrigerante a esa temperatura aumenta, produciendo un mayor efecto refrigerante (aumenta la diferencia de entalpías $h_2 - h_1$, ver diagrama p-h en la figura 51), según la ecuación de capacidad para un sistema de refrigeración (ecuación 1.1), si el efecto refrigerante aumenta, el motor del compresor necesitara circular menos cantidad de refrigerante por unidad de tiempo para que la capacidad del sistema de refrigeración permanezca igual.

$$CAP = \dot{m}_r * (h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

Para disminuir la cantidad de refrigerante circulante, las revoluciones necesarias a las que gira el motor del compresor deben disminuir, además si tenemos en cuenta que a una mayor temperatura de saturación del refrigerante la densidad del refrigerante también aumenta, las revoluciones necesarias a las que debe girar el motor del compresor deben ser mucho menores para mantener la misma capacidad (ver ecuación 1.5).

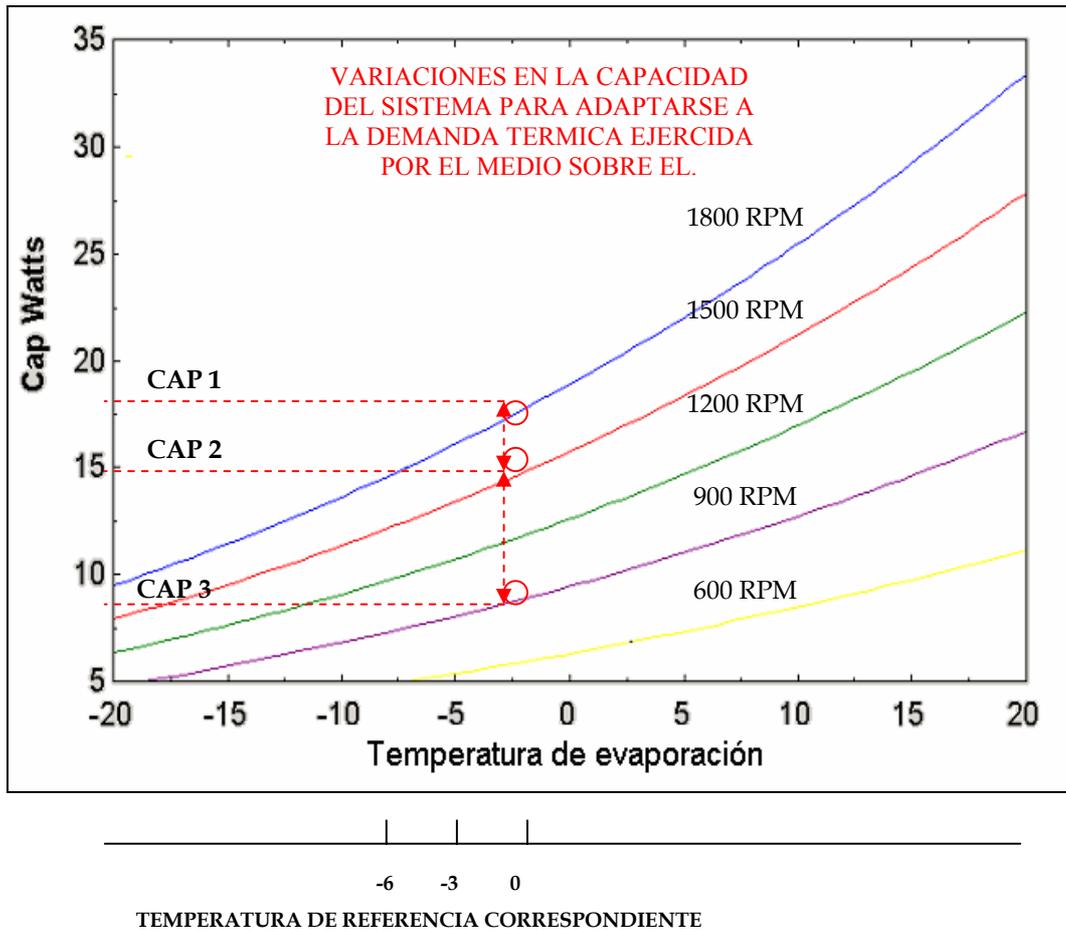


FIGURA 50 ADAPTACION DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA A LA CARGA TERMICA IMPUESTA PARA MANTENER CONSTANTE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO A LA TEMPERATURA DE REFERENCIA CORRESPONDIENTE

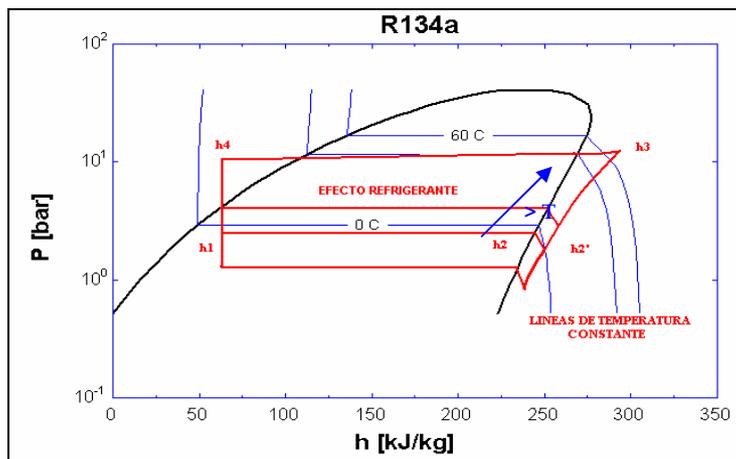


FIGURA 51 EFECTO DEL AUMENTO DE LA TEMPERATURA DE SATURACION DEL REFRIGERANTE EN EL DIAGRAMA PRESION- ENTALPIA

$$CAP = \rho_r * \left(\frac{\pi * D^2}{4} * L * n\right) * RPM * (h2 - h1) * \epsilon_T \quad (1.5)$$

La figura 52 ilustra el comportamiento de la explicación anterior, lo cual quiere decir que para conservar el sistema de refrigeración a una misma capacidad (manteniendo la carga térmica constante) las revoluciones a las que necesita girar el compresor son menores para una temperatura de referencia alta que para una temperatura de referencia baja y el punto de operación del sistema de refrigeración se desplazara a través de una línea horizontal al variar la temperatura de referencia.

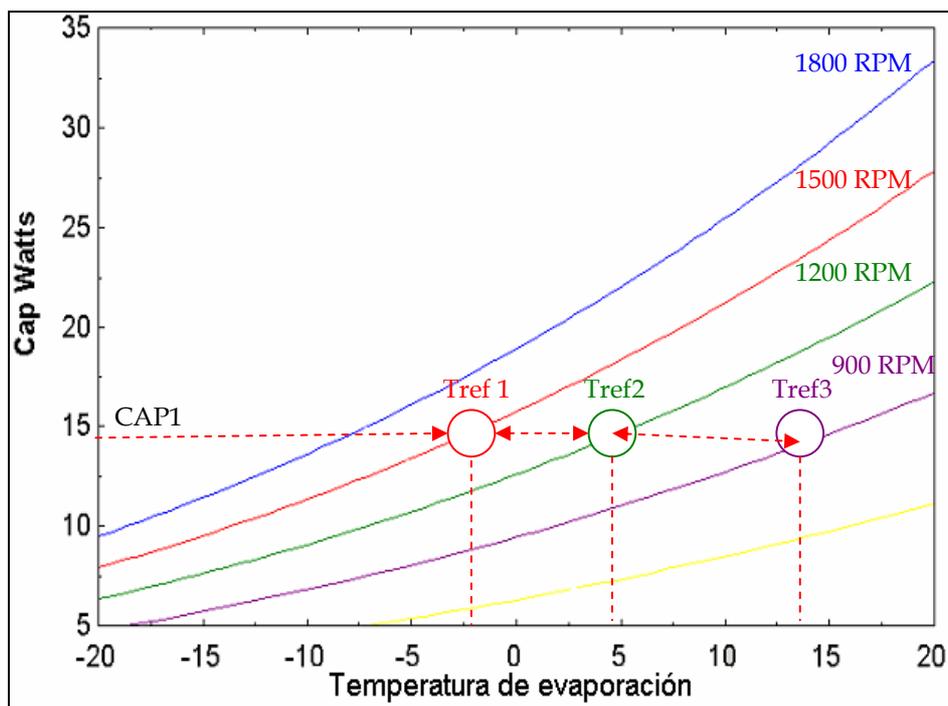


FIGURA 52 DISMINUCION DE LAS REVOLUCIONES DEL COMRESOR AL AUMENTAR LA TEMERATURA DE REFERENCIA CUANDO SE TIENE UNA CARGA TERMICA CONSTANTE

6.1.3 Respuesta de la estrategia ante una condición de capacidad del sistema variable y temperatura de referencia variable. El desplazamiento real de la capacidad y del punto de operación del sistema de refrigeración al disminuir la

temperatura de referencia obedece una trayectoria diagonal como se muestra en la figura 53, debido a dos razones importantes:

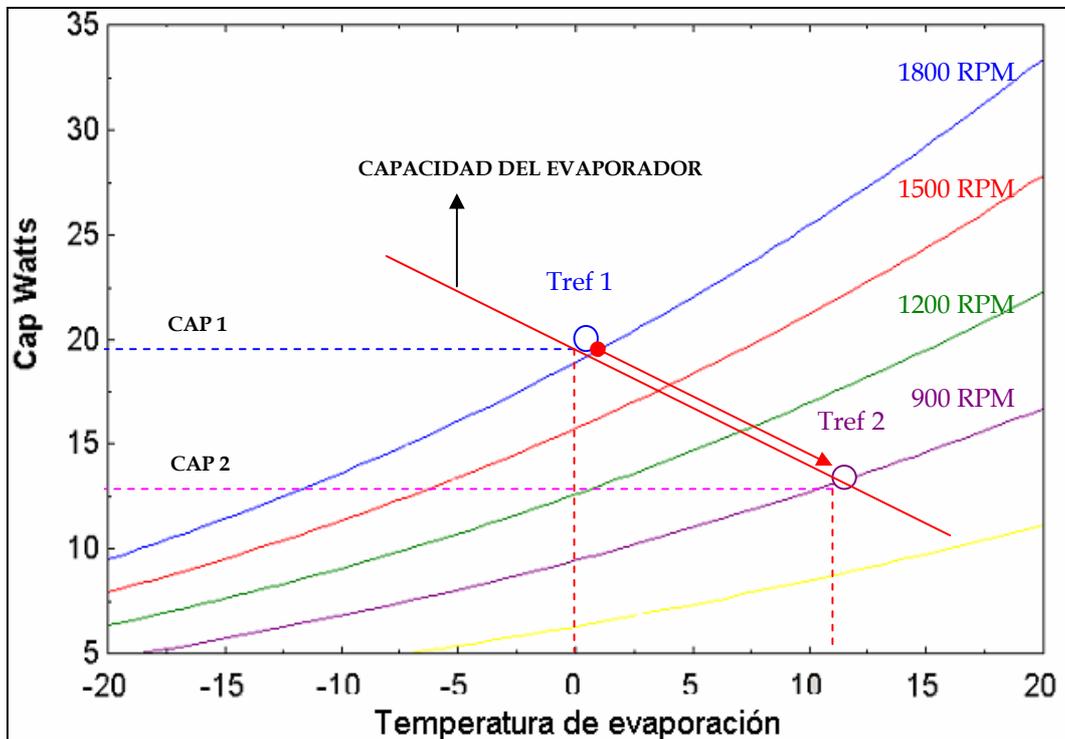


FIGURA 53 TENDENCIA NATURAL DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA AL AUMENTAR LA TEMPERATURA DE REFERENCIA

- La conservación del balance del sistema. Para un evaporador y una unidad condensadora conectados en un sistema en común se establece una condición de equilibrio automáticamente entre los dos, de manera que la rapidez de condensación es siempre igual a la de vaporización, razón por lo cual se presenta un acomodamiento entre las dos unidades para mantener el balance del sistema.
- La carga térmica existente disminuye como producto de la disminución de la transferencia de calor entre el ambiente exterior y el ambiente interior como resultado de la reducción de la diferencia de temperaturas entre ellos.

Así al disminuir la temperatura de referencia la capacidad del sistema de refrigeración se desplazara a lo largo de la línea de capacidad del evaporador y la nueva capacidad del sistema corresponderá al punto donde se presente el balance del sistema.

6.2 COMO SE REALIZA LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

6.2.1 Acción básica de control

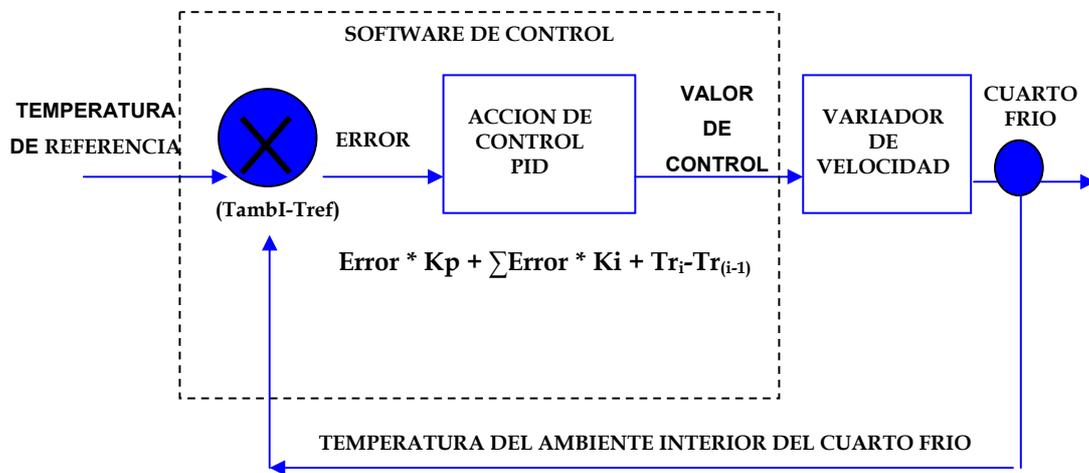


FIGURA 54 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

La estrategia de control continuo es un sistema de lazo cerrado (ver figura 54), la cual compara el valor de la temperatura del ambiente interior del cuarto de conservación (temperatura controlada) con la temperatura de referencia (en este caso la temperatura de referencia corresponde exactamente a la temperatura la cual se desea conservar el producto), determina la desviación (error) y produce una acción de control que reducirá la desviación a cero o a un valor muy pequeño. Algunas de las acciones de control continuo utilizadas en sistemas industriales son controladores PID, lógica difusa y redes neuronales. El tipo de acción que mejor se adecua a las características y requerimientos de la estrategia de control continuo es

la acción de control proporcional-integral-derivativa -PID-. Esta acción de control, es implementada a través de un software de control que es el encargado de comparar el valor medido de la temperatura controlada con el valor de la temperatura de referencia y determinar una señal de error que representa la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, en relación a esta señal de error el software de control genera una acción de control proporcional-integral-derivativa (PID) que alimenta a un dispositivo corrector final (variador de velocidad) que es el encargado de disminuir la diferencia de temperaturas a cero. El ajuste de las ganancias proporcional K_p , integral K_i , derivativa K_d para el controlador automático PID se hizo experimentalmente buscando la mejor respuesta por parte del sistema a posibles perturbaciones de la temperatura ambiental interior del cuarto frío tales como el ingreso de personas al ambiente refrigerado o un aumento en la temperatura del medio ambiente exterior (ver figura 55).

$C_p := K_p * \text{error};$ $C_i := C_i + K_i * \text{error};$ $C_d := K_d * (\text{TempAmbI} - \text{TempAnterior}) / \text{tiempo};$ $\text{TempAnterior} := \text{TempAmbI};$ $\text{Valor de control} := C_p + C_i - C_d$	$K_p = 0.5$ GANANCIA PROPORCIONAL $K_i = 0.05$ GANANCIA INTEGRAL $K_d = 0.05$ GANANCIA DERIVATIVA
--	---

FIGURA 55 PROGRAMACIÓN DE LA ACCION PID EN EL SOFTWARE DE CONTROL

El control derivativo en las aplicaciones de refrigeración en estado estable no es necesario ya que la rapidez con la que se dan los cambios de temperatura en el interior del cuarto frío la mayor parte del tiempo es muy baja y si además consideramos la demora en la respuesta de los sensores de temperatura (termocuplas) la rapidez resulta aun menor, lo cual produce que la ganancia derivativa tenga un valor muy pequeño todo el tiempo.

6.2.2 Forma de variar las RPM en la estrategia de control continuo. Teniendo en cuenta que la estrategia de control continuo requiere un ajuste refinado de las revoluciones del compresor se estudiaron posibles soluciones como:

- Motores de velocidad variable: tiene un numero finito de velocidades
- Cambiando el radio de la polea: numero finito de velocidades
- Variadores de velocidad electrónicos: permiten un sin número de posibles velocidades (ver anexo A).

Los variadores de velocidad electrónicos permiten un ajuste refinado de la velocidad del motor del compresor y pueden ser ajustados automáticamente por el software de control y es por lo tanto la mejor forma de implementar esta estrategia de control.

El principio utilizado por los variadores de velocidad para cambiar la velocidad de los motores eléctricos de inducción esta basado en el hecho que las revoluciones del motor son proporcionales a la frecuencia de alimentación de la energía eléctrica con que se alimenta:

$$N = \frac{f * 120}{p} - s \quad (6.1)$$

N = velocidad del motor en revoluciones

f = frecuencia de alimentación del motor en Hz

p = numero de polos del estator

s = deslizamiento del motor en revoluciones por minuto



FIGURA 56 VARIADORES DE VELOCIDAD ELECTRONICOS

La manera como los variadores de velocidad electrónicos adaptan la frecuencia de alimentación del motor eléctrico de inducción se resume en la figura 57:

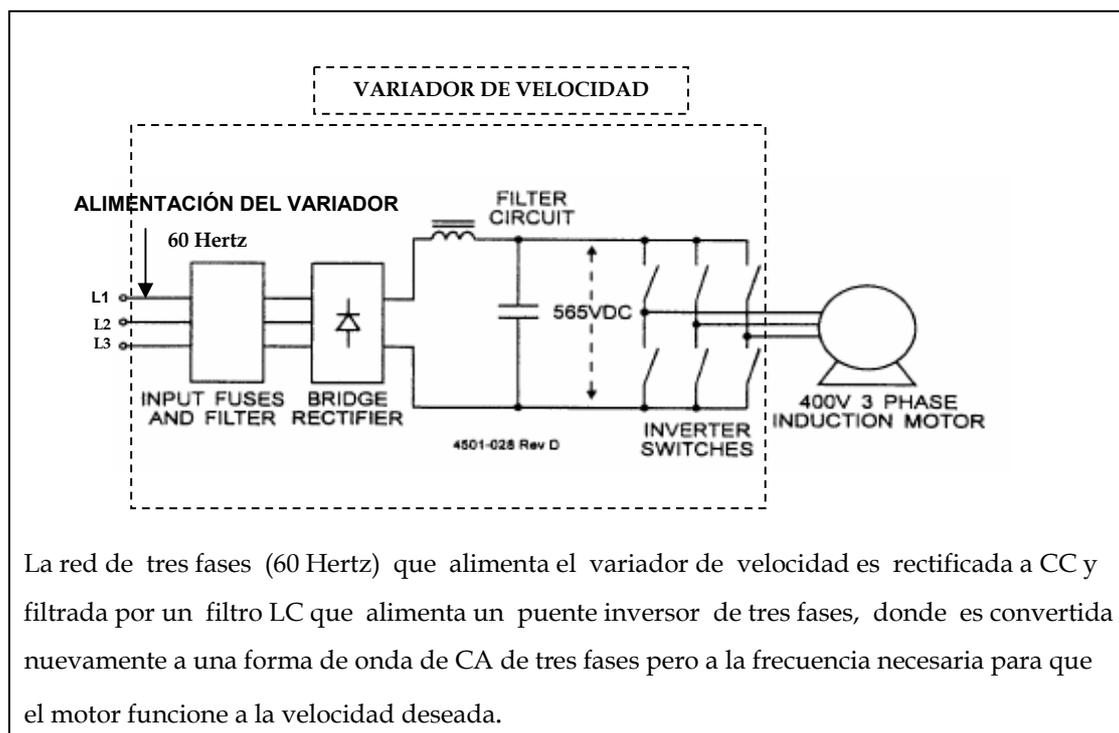


FIGURA 57 ADAPTACION DE LA FRECUENCIA DE ALIMENTACIÓN DEL MOTOR DEL COMPRESOR EN EL VARIADOR DE VELOCIDAD

6.2.3 Control de la frecuencia en la estrategia de control continuo. El variador de velocidad es operado con señales de control entre 0-20 mA, cuando una señal de 0 mA es inducida en sus bornes de control el variador de velocidad ajustara la frecuencia de inducción del motor del compresor al valor de frecuencia mínimo programado en el, cuando se induce un valor de 20 mA ajustara el valor de la frecuencia máxima.

El valor de la frecuencia mínima que se debe ajustar el variador de velocidad esta relacionado con la máxima amplitud de vibraciones en las que sea posible trabajar el compresor.

Para conocer el nivel de vibraciones apropiado para trabajar el compresor es necesario realizar un análisis de vibraciones mecánicas como el mostrado en la figura 58 para conocer la amplitud de las vibraciones a las frecuencias en que podría trabajar el compresor.

Mediante un análisis de vibraciones en las direcciones horizontal, vertical y axial del compresor Copeland CS12K6E-TF5 de 1.8 Hp se logro establecer que por debajo de una frecuencia de alimentación de 11.36 Hertz no se debe trabajar el compresor por que se presenta un aumento significativo en la amplitud de las vibraciones en todas las direcciones, situación que resulta perjudicial para la vida útil del equipo y para el buen estado de la tubería (el estudio de vibraciones realizado al compresor se muestra a continuación, figura 58).

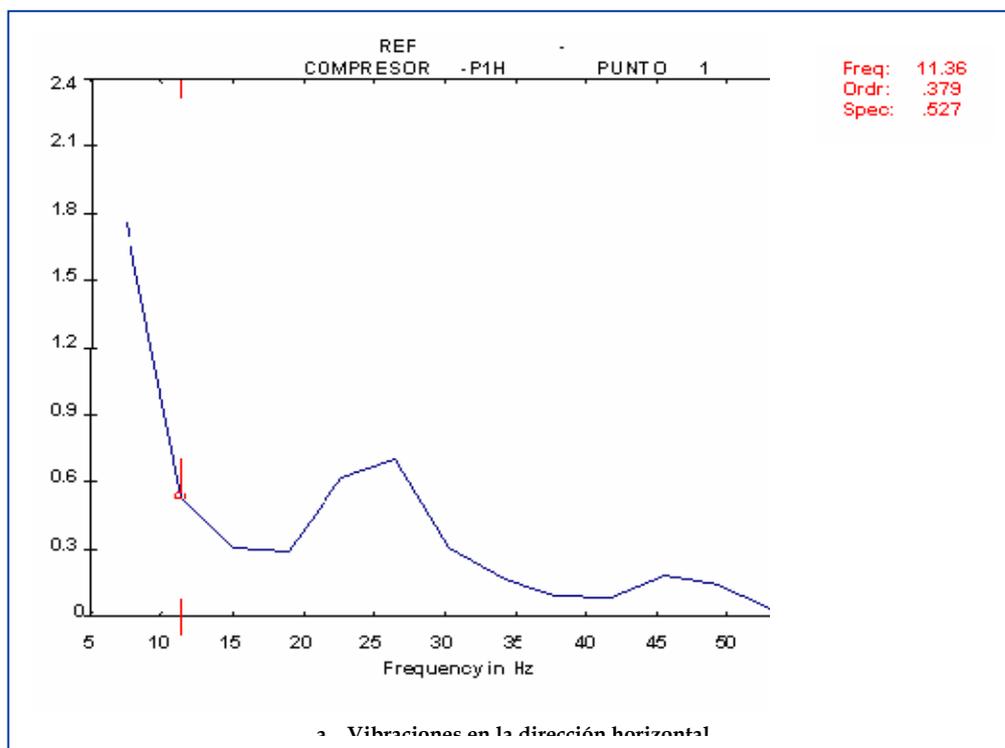
Según el anterior análisis de vibraciones un valor de control de 0 mA deberá corresponder a una frecuencia de 12 Hertz y un valor de control de 20 mA corresponderá a una frecuencia de 60 Hertz, así la frecuencia a la cual se encuentra el equipo será función del valor de control (amperaje entregado al variador de velocidad):

$$\begin{aligned} \text{FrecuenciaVariador} &:= (60-12)/20 * \text{AmpVariador} + 12 \\ & \hspace{15em} (6.2) \\ \text{AmpVariador} &= \text{Valor de control} \end{aligned}$$

Donde el valor de control se determina según la desviación que tenga la temperatura del ambiente interior del cuarto (ambiente refrigerado) de la temperatura de referencia en la acción de control PID.

El uso de la estrategia de control continuo se limita al rango de frecuencias permisibles para operar el equipo, lo cual conlleva a que su utilización dependa de la clase de compresor utilizado y de la capacidad en exceso en que se encuentre el sistema de refrigeración de la carga máxima sostenida. Así la temperatura de referencia mas alta (que es cuando hay menos carga térmica) a la cual podemos usar la estrategia de control continuo será la que corresponda a la mínima frecuencia de funcionamiento y la temperatura de referencia mas baja la correspondiente a la máxima frecuencia de operación.

La temperatura de referencia más alta permisible para la estrategia en el compresor Copeland CS12K6E-TF5 a las condiciones en que se realizaron las pruebas es de 0° centígrados y la temperatura de referencia mas baja -10° centígrados.



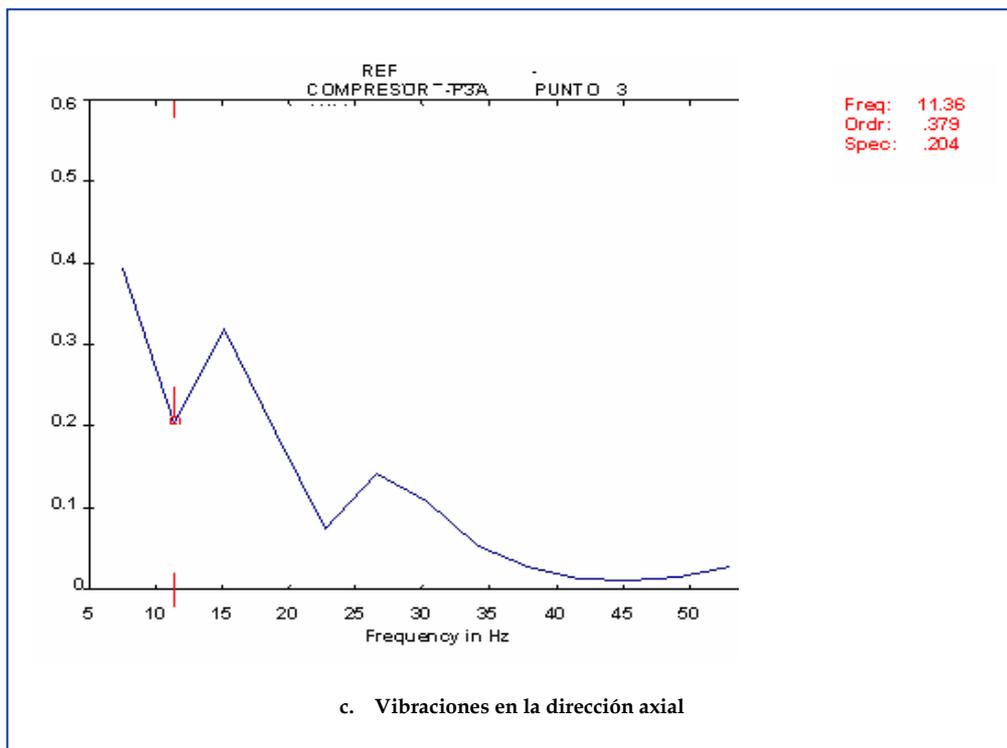
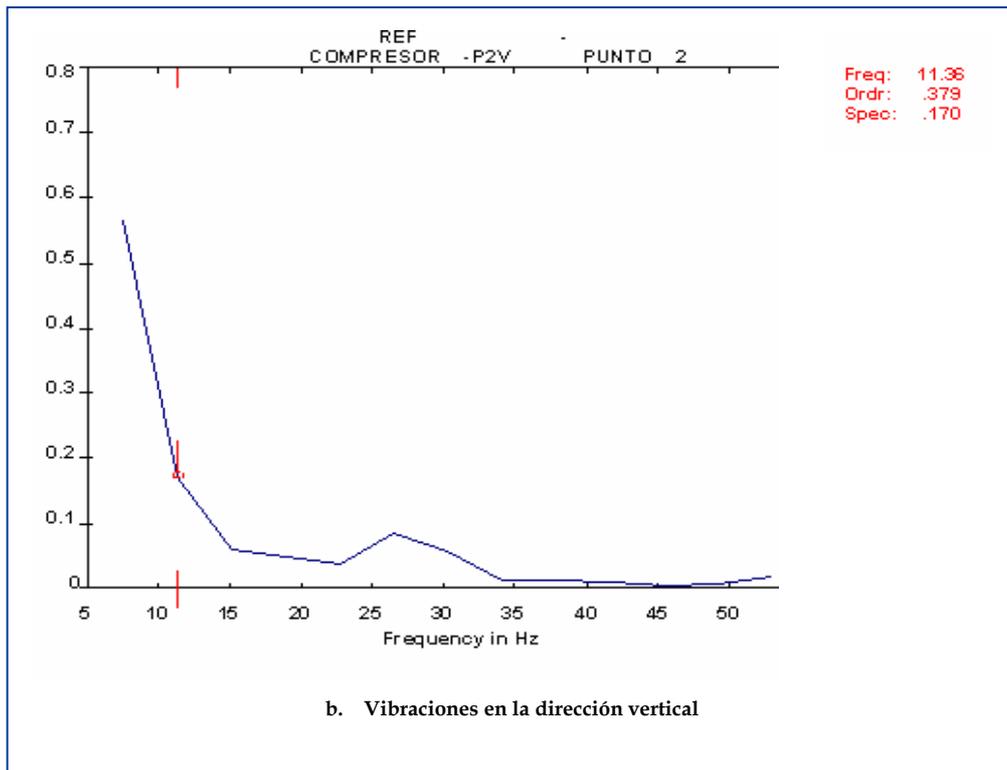


FIGURA 58 ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA EL COMPRESOR COPELAND CS12K6E-TF5

6.3 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUÓ

La estrategia de control continuo implementada adapta la capacidad del sistema de refrigeración a la carga térmica cada segundo, si la carga térmica varía como resultado de un aumento en la temperatura ambiental exterior ó súbitamente como resultado de una perturbación al ambiente refrigerado la estrategia buscará la frecuencia apropiada a la que se debe alimentar el motor del compresor (como se muestra en la figura 59) para tener las revoluciones necesarias a las cuales la cantidad de refrigerante circulante es suficiente para asegurar que la temperatura controlada no se desvíe de la temperatura de referencia y garantizar la permanencia de la temperatura del producto casi igual a la de referencia (ver figura 60). Esto se considera como la principal ventaja de la estrategia de control continuo, razón fundamental por lo cual es preponderante en muchas aplicaciones de la refrigeración.

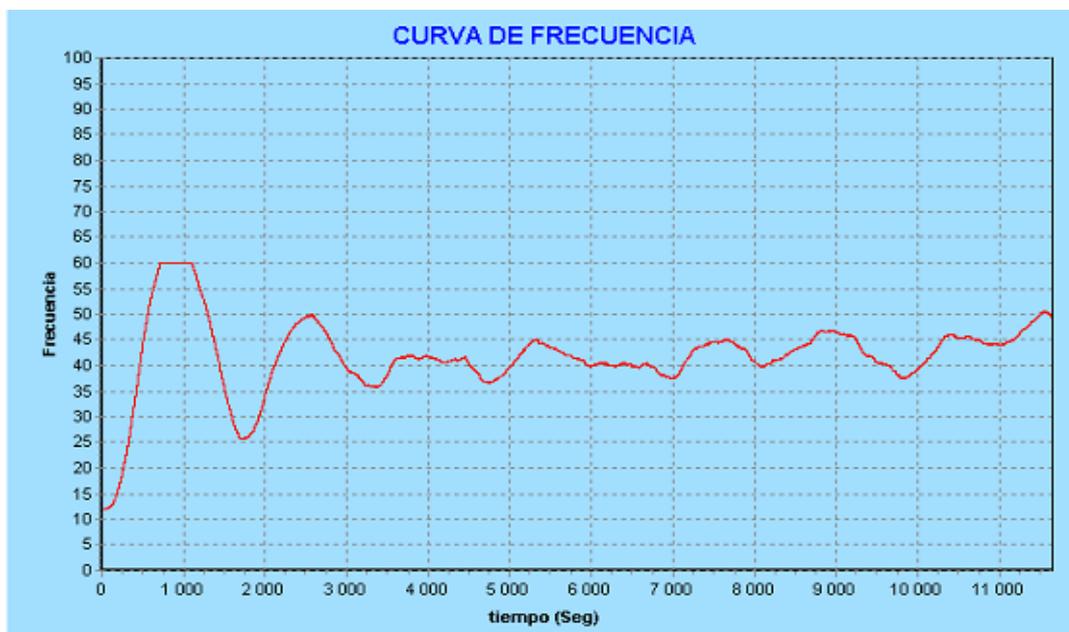


FIGURA 59 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ALIMENTACIÓN DEL MOTOR DEL COMPRESOR PARA MANTENER LA TEMPERATURA CONTROLADA IGUAL A LA TEMPERATURA DE REFERENCIA

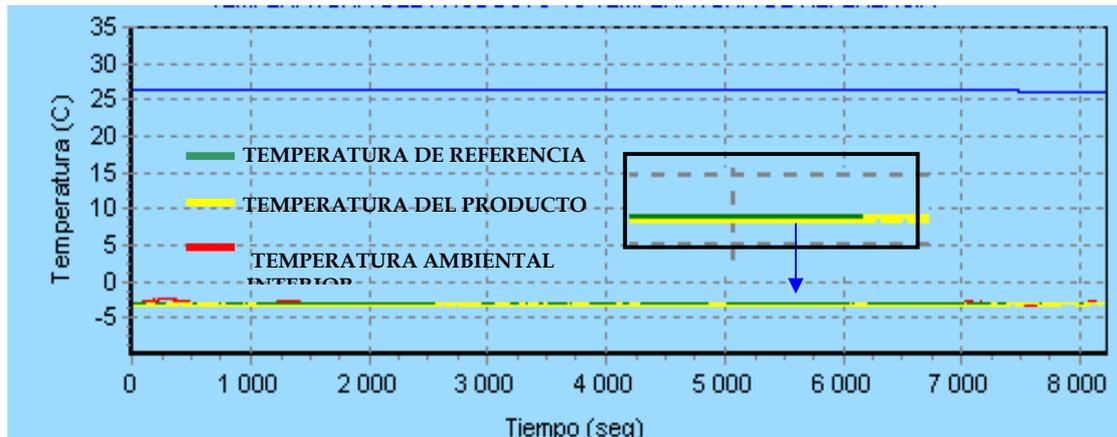


FIGURA 60 EXACTITUD DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

El comportamiento del sistema de refrigeración así como de las propiedades del refrigerante y de las temperaturas del producto en conservación y del ambiente interior del cuarto frío presentan un comportamiento diferente dependiendo de unas condiciones dadas:

- Antes de establecerse el equilibrio térmico (al entrar el producto al cuarto de conservación)
 - A su vez el comportamiento es modificado dependiendo de la condición de carga a la que se encuentre el sistema.
 - Carga baja
 - Carga alta
- Después del equilibrio térmico. El comportamiento variara dependiendo de las condiciones a las que sea sometido el sistema de refrigeración como:
 - Variación de la temperatura ambiental exterior
 - Las perturbaciones a las que sea sometido el sistema de refrigeración

6.3.1 Antes de establecerse el equilibrio térmico (comportamiento del sistema al entrar el producto al cuarto de conservación). Al iniciar el proceso de conservación la temperatura a la que se encuentra el producto conservado se va

acercando a la temperatura del ambiente interior (se encuentra a la temperatura de referencia) hasta que finaliza la transferencia de calor entre el producto y el ambiente refrigerado, como resultado de esto, se igualan la temperatura del ambiente interior con la temperatura del producto y se establece un equilibrio térmico entre el ambiente interior y el producto en conservación (ver figura 61).

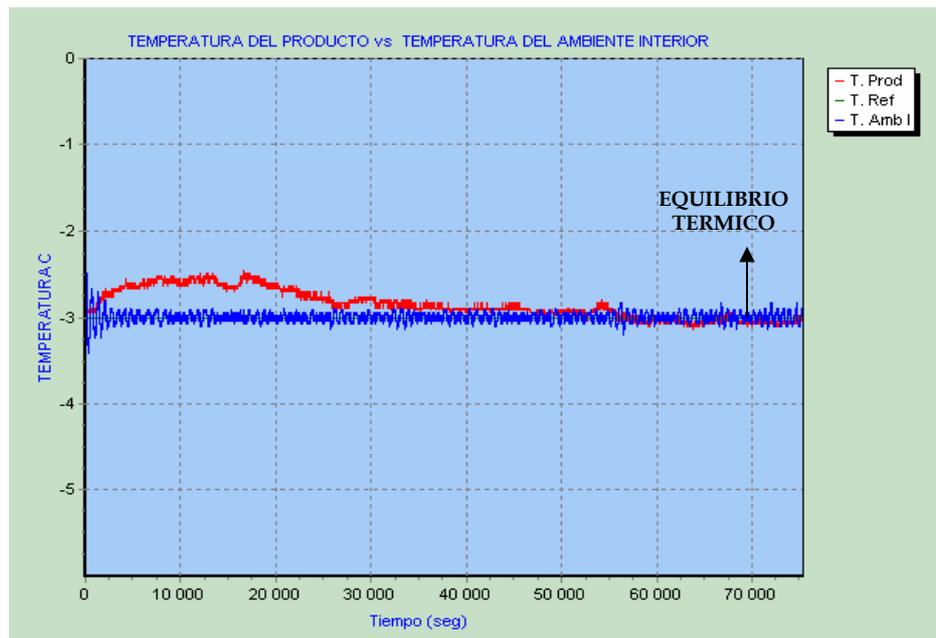


FIGURA 61 TEMPERATURA DEL PRODUCTO VS TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR A UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -3°C

El tiempo que se gasta en alcanzar el equilibrio térmico entre el ambiente interior y el producto en conservación dependerá de la cantidad de producto a conservar y de la temperatura a la que se ingrese el producto al ambiente interior del cuarto de conservación.

En la industria de la refrigeración el producto por lo general ingresa a los cuartos de conservación a una temperatura menor que la temperatura de referencia, mientras se alcanza el equilibrio térmico entre la temperatura ambiental interior y la temperatura del producto se presenta una oscilación de la temperatura ambiental interior alrededor de la temperatura de referencia como resultado de la

inercia térmica existente, la amplitud de la oscilación dependerá de la cantidad de producto a conservar (Carga baja ó Carga alta).

6.3.1.1 Con carga baja. Si la cantidad de producto es poca, mientras se alcanza el equilibrio térmico se nota una oscilación con una pequeña amplitud, no mayor de 0.5° C de la temperatura del ambiente interior alrededor de la temperatura de referencia. Este comportamiento se ilustra en la figura 62.

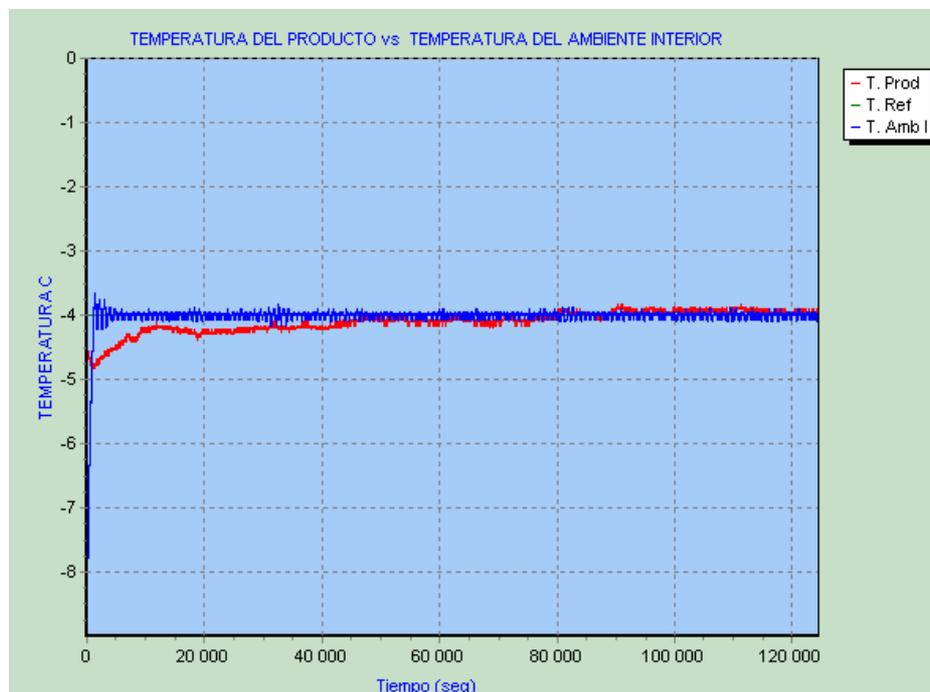


FIGURA 62 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO vs. TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR CUANDO SE TIENE POCA CANTIDAD DE PRODUCTO A CONSERVAR PARA UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -4°C

La oscilación de la temperatura del ambiente interior de igual forma repercute en la frecuencia con la que se alimenta el equipo así:

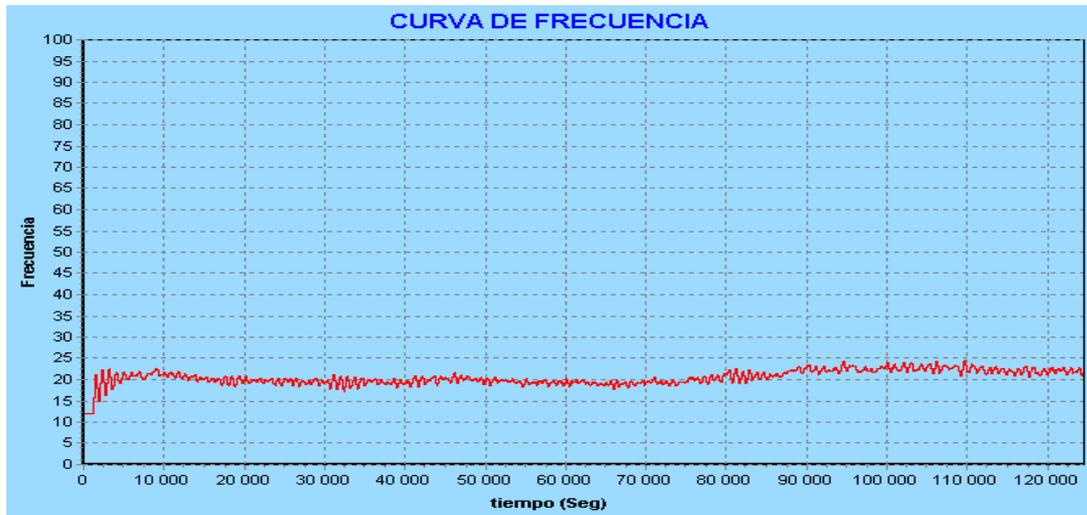


FIGURA 63 FRECUENCIA DE ALIMENTACION PARA UN POCA CANTIDAD DE PRODUCTO A UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -4°C

Las temperaturas del resto del ciclo de refrigeración (figura 64) se ven menos afectadas pero de igual forma se siente el suceso.

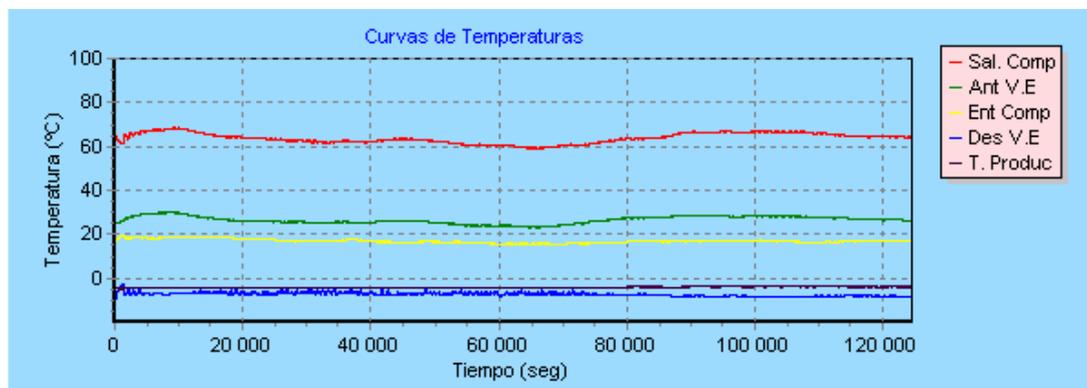


FIGURA 64 TEMPERATURAS DEL CICLO DE REFRIGERACION CON POCA CANTIDAD DE PRODUCTO AL INICIAR LA CONSERVACION DEL PRODUCTO

6.3.1.2 Con carga alta. Si se aumenta la cantidad de producto que ingresa al ambiente interior del cuarto de conservación el tiempo en que se alcanza el equilibrio será mucho mayor y las oscilaciones de la temperatura del ambiente interior alrededor de la temperatura de referencia incrementaran su amplitud (ver figura 65), amplitud que ira disminuyendo en la medida que se vaya alcanzando el equilibrio térmico.

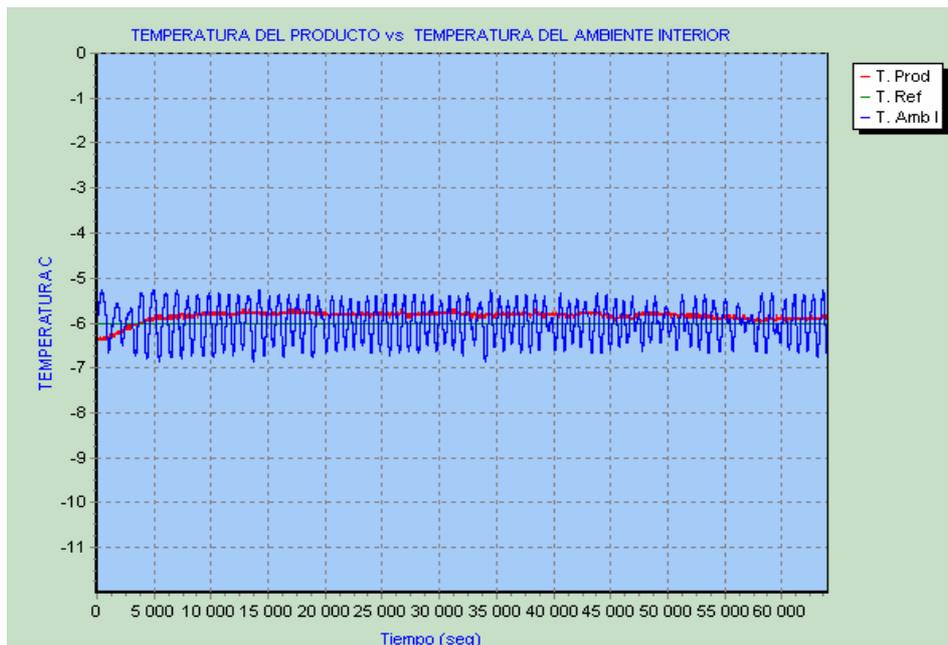


FIGURA 65 OSCILACIONES DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL INTERIOR ALREDEDOR DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA, CON CARGA ALTA A UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C

Igualmente las oscilaciones se ven reflejadas en la frecuencia de alimentación del equipo (ver figura 66) y en las temperaturas del refrigerante en cada uno de los puntos del ciclo de refrigeración (ver figura 67).

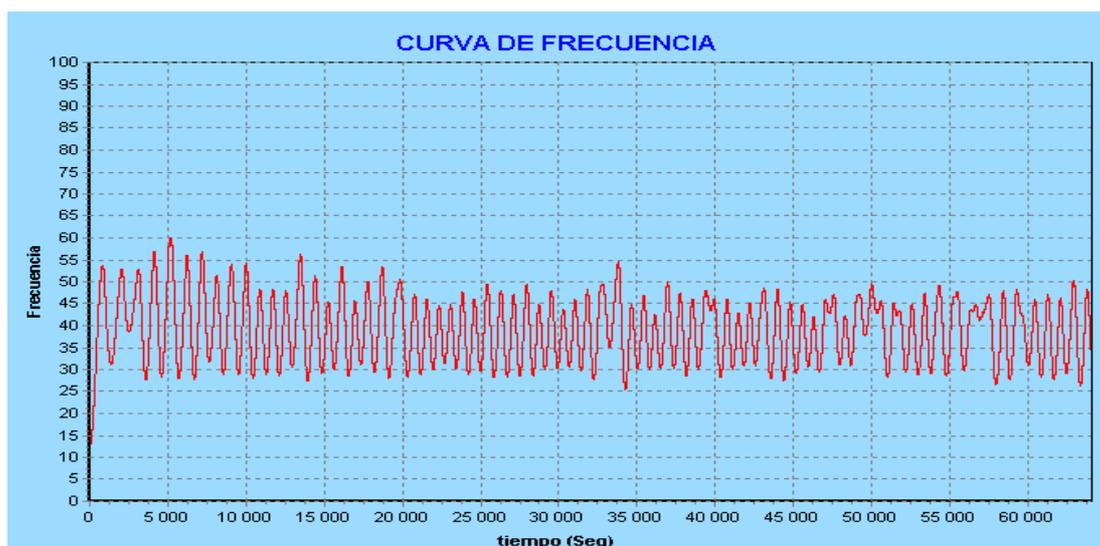


FIGURA 66 FRECUENCIA DE ALIMENTACION PARA UNA GRAN CANTIDAD DE PRODUCTO A UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C

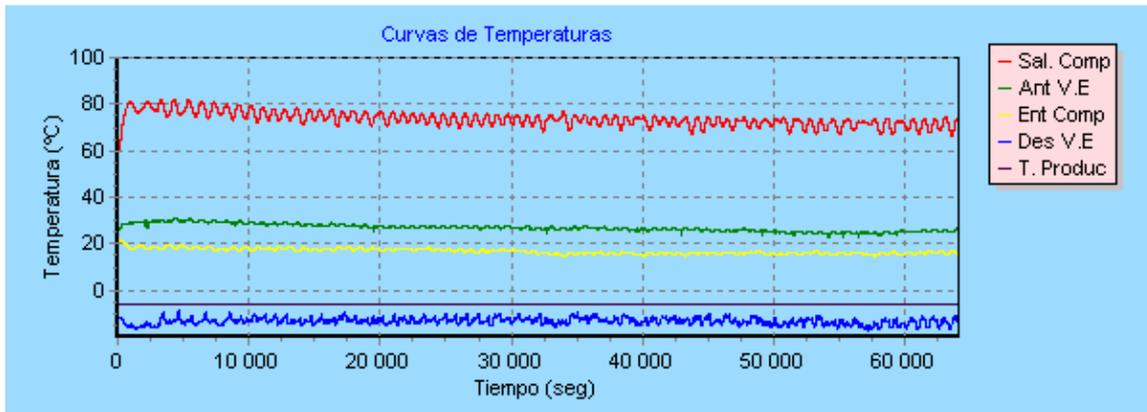


FIGURA 67 TEMPERATURAS DEL CICLO DE REFRIGERACION CON UNA GRAN CANTIDAD DE PRODUCTO AL INICIARSE LA CONSERVACION PARA UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C

6.3.2 Comportamiento del sistema al establecerse el equilibrio térmico entre el producto y el ambiente interior. Al establecerse el equilibrio térmico entre el ambiente interior y el producto en conservación el comportamiento es diferente y dependerá de las posibles perturbaciones que se hagan al ambiente interior del cuarto de conservación y en una menor medida de la variación de la temperatura ambiental externa.

6.3.2.1 Como función de la temperatura ambiental exterior. A una temperatura ambiental exterior constante la temperatura del ambiente interior y la temperatura del producto junto con la temperatura del refrigerante en cada uno de los puntos del ciclo de refrigeración permanecen invariables (ver figura 68), así mismo la frecuencia en que trabaja el equipo a la carga térmica correspondiente permanece constante.

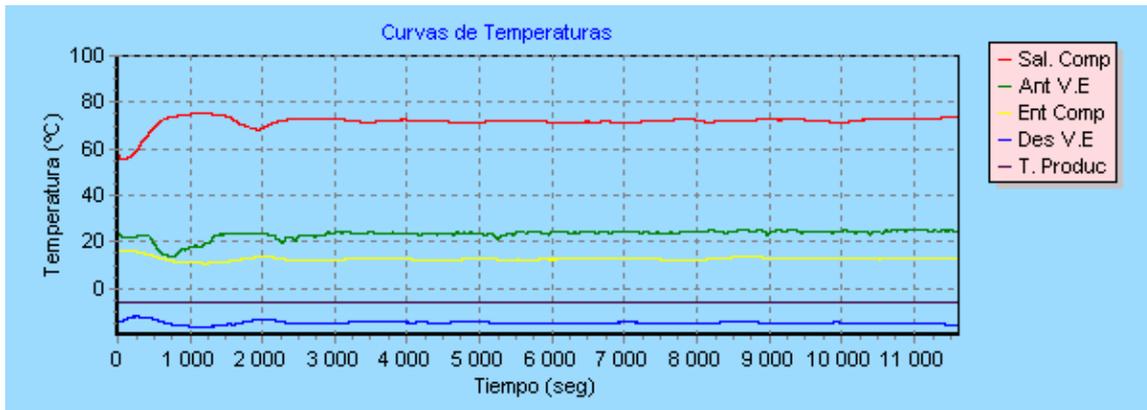


FIGURA 68 TEMPERATURAS DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN

Pero en el transcurso del día la temperatura del ambiente exterior aumenta o disminuye dependiendo de las condiciones climáticas presentes, haciendo que la carga térmica cambie y la capacidad del sistema deba ser ajustada. El sistema de control funciona bastante bien con los cambios del clima, la desviación de la temperatura del producto con respecto a la temperatura de referencia es despreciada, la temperatura del ambiente interior con los cambios climáticos es mas perceptible y esto ocasiona que oscile alrededor de la temperatura de referencia, con una amplitud no mayor de 0.1 grado (ver figura 69), independiente de la temperatura de referencia establecida. La oscilación de la temperatura del ambiente interior es producto de la continua adaptación que hace la estrategia de control continuo a la variación de la carga térmica sobre el sistema, esta adaptación también ocasiona una continua oscilación de la frecuencia de operación del equipo (ver figura 70).

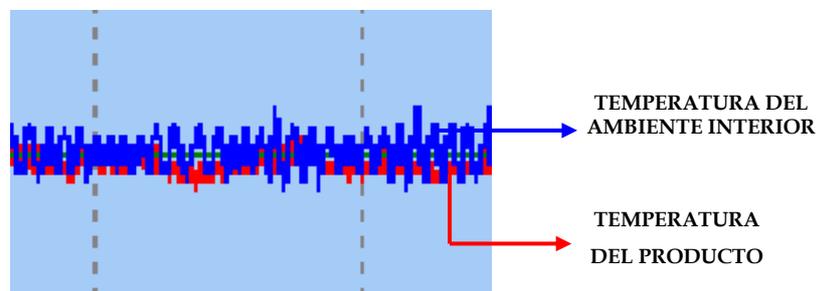


FIGURA 69 OSCILACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO VS TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR

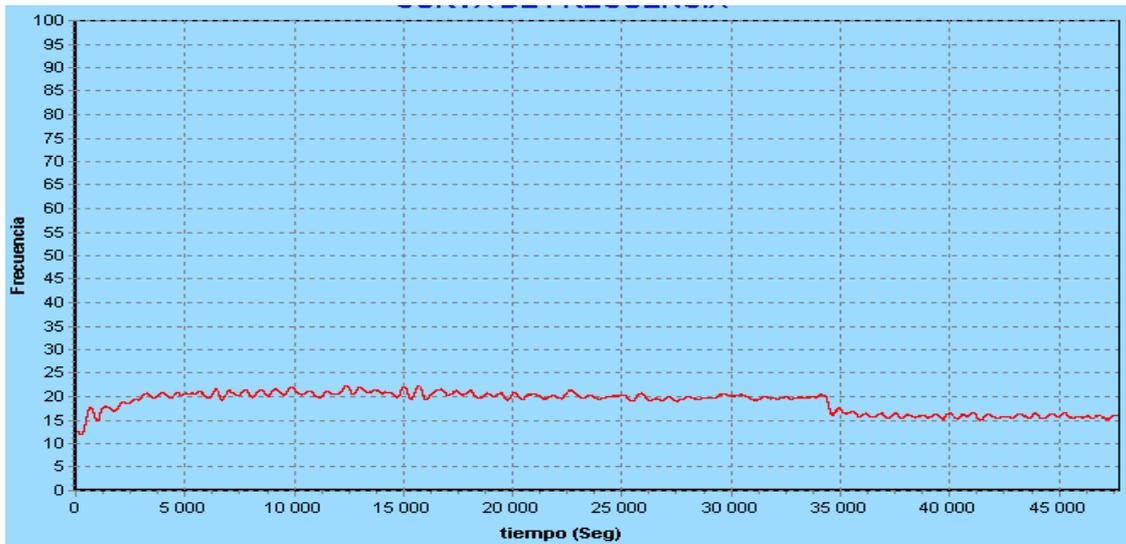


FIGURA 70 CAMBIO EN LA FRECUENCIA DE OPERACIÓN DEL MOTOR DEL COMPRESOR COMO RESULTADO DEL CAMBIO EN LA CARGA TÉRMICA PRODUCTO DE LA VARIACION DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EXTERIOR DURANTE EL TRANCURSO DEL DIA

La temperatura del refrigerante en los puntos del ciclo de refrigeración cambian, siguiendo la misma tendencia que la temperatura ambiental exterior, la temperatura mas sensible a los cambios climáticos es la temperatura con la que se descarga el refrigerante a la salida del compresor (ver figura 71).

6.3.2.2 Como función de las perturbaciones al equilibrio térmico. El equilibrio térmico puede ser alterado por posibles interrupciones al ambiente interior del cuarto de conservación, (cuando se penetra en el ó se abre la puerta para sacar una cantidad de producto) lo cual genera que el sistema este sometido a una carga térmica intermitente. Dependiendo de la regularidad con la que se lleven a cabo estas interrupciones y del tiempo que duren las mismas se renovara el equilibrio rápidamente o el sistema tardara en regresar al equilibrio nuevamente.

Cuando el sistema de refrigeración es sometido a una carga térmica intermitente normal (entre una persona al ambiente interior durante 15 seg. cada $\frac{1}{2}$ hora), la temperatura del producto oscilara alrededor de la temperatura de referencia con una amplitud no mayor de 0.1 grados Centígrados, y la temperatura del ambiente refrigerado oscilara con una amplitud de 1-1.5 grados centígrados (como se

muestra en la figura 72). La amplitud de estas oscilaciones aumentara en forma proporcional a la magnitud de la fuente de perturbación, de la regularidad con la que se hagan y del tiempo que duren las mismas.

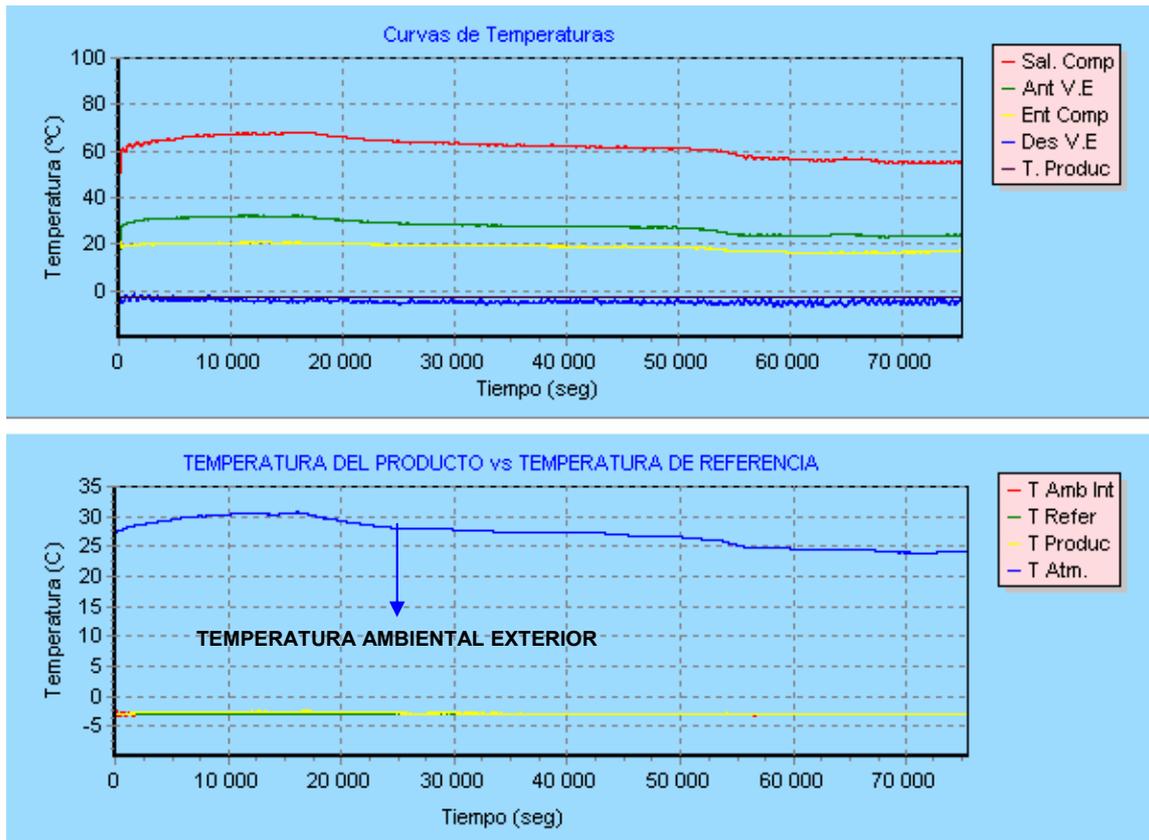


FIGURA 71 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE
CON EL CAMBIO DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EXTERIOR.

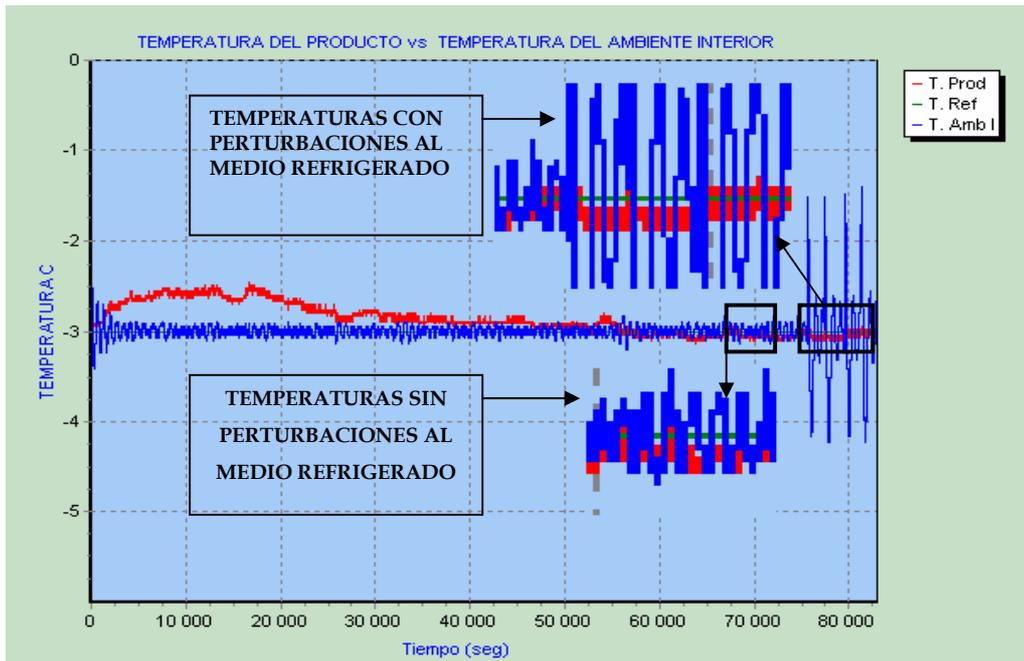


FIGURA 72 TEMPERATURA DEL PRODUCTO VS TEMPERATURA DE REFERENCIA CON PERTURBACIONES SOBRE EL AMBIENTE REFRIGERADO

Las cargas térmicas intermitentes que afectan el medio refrigerado también influyen sobre las temperaturas del refrigerante en los puntos del ciclo de refrigeración donde el refrigerante sufre algún tipo de transformación (ver figura 73).

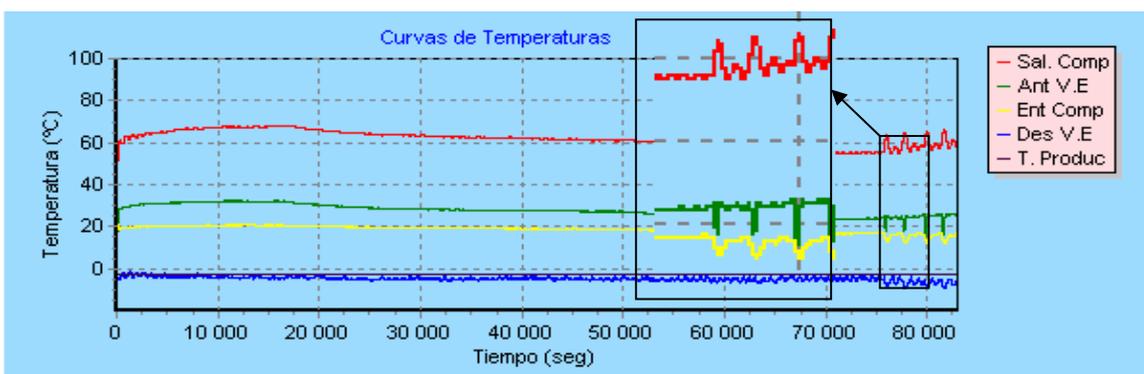


FIGURA 73 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE CUANDO EL SISTEMA SE SOMETE A CARGAS TÉRMICAS INTERMITENTES

Al presentarse una perturbación sobre el sistema con estrategia de control continuo este responderá inmediatamente aumentando la capacidad del sistema de refrigeración, por medio del aumento de la frecuencia de operación del motor del compresor (ver figura 74), para que aumenten sus revoluciones y la cantidad de refrigerante se incremente y el sistema pueda sacar el calor adicional agregado por la nueva fuente de calor.

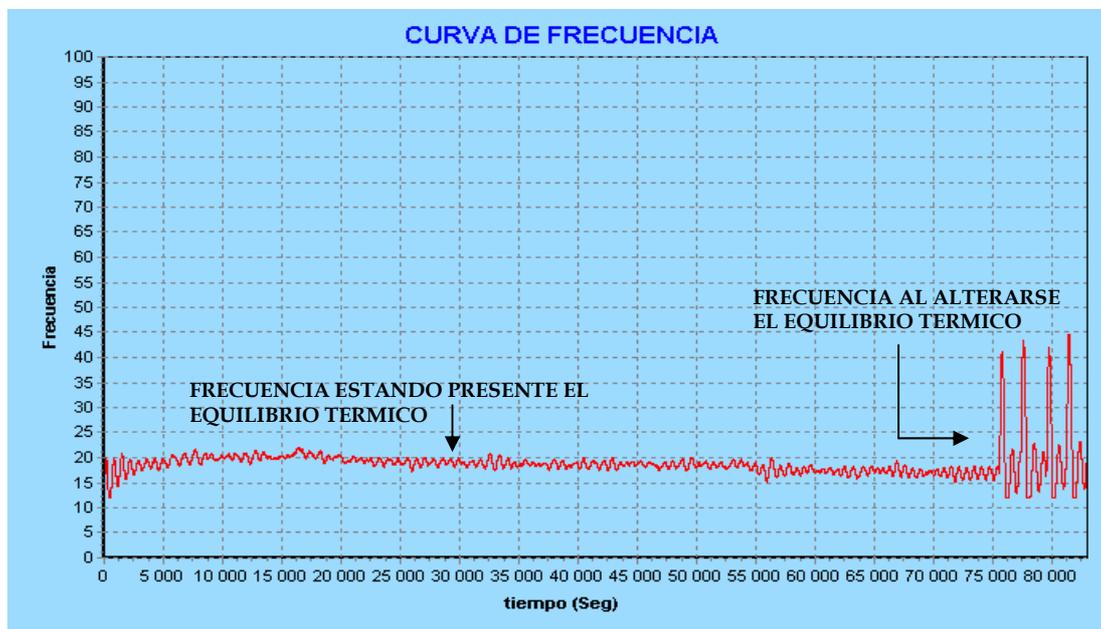


FIGURA 74 RESPUESTA INMEDIATA DEL SISTEMA DE CONTROL A LAS PERTURBACIONES HECHAS SOBRE EL AMBIENTE INTERIOR

6.4 CONSUMO DE ENERGÍA CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

Por medio de la realización de pruebas experimentales variando los diferentes escenarios de trabajo con una estrategia de control continuo se determinaron los siguientes resultados para el consumo de energía.

Tabla 4. Consumo de energía con la estrategia de control continuo.

CONSUMO CONTROL CONTINUO EN Kwh./10 horas				
T. Referencia	CA SP	CA CP	CB SP	CB CP
-6	2.959	3.884	1.07	2.332
-3	1.012	1.862	0.701	0.88
0	0.341	0.924	0.332	0.567

CA: Carga Alta (Equivale a 70 Galones de agua en el interior del cuarto frío)

CB: Carga Baja (Equivale a 20 Galones de agua en el interior del cuarto frío)

SP: Sin Perturbaciones

CP: Con Perturbaciones

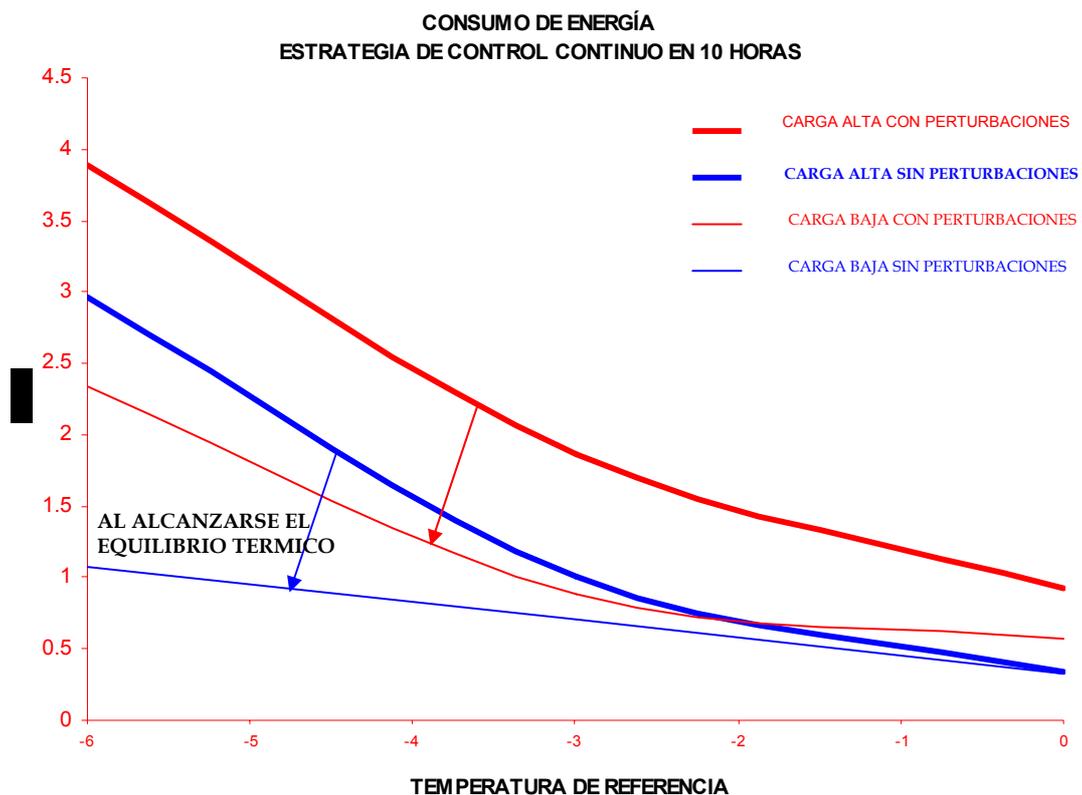


FIGURA 75 CONSUMO DE ENERGÍA PARA UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

Como se muestra en la figura 75 la tendencia en el consumo de energía con la estrategia de control continuo al iniciarse el proceso de conservación es lineal para cargas bajas ó poca cantidad de producto refrigerado y en la medida que aumenta la carga sobre el sistema la línea de tendencia aumenta su pendiente proporcionalmente con el aumento de las fuentes de calor sobre el ambiente refrigerado hasta adquirir una tendencia de tipo exponencial como función de la temperatura de referencia.

En la medida que se va alcanzando el equilibrio térmico la línea de consumo de energía con carga alta (con o sin perturbaciones) se va desplazando paralelamente y se va pareciendo mas a la condición de carga baja (línea azul o roja delgada en la figura 75) hasta que se alcanza el equilibrio.

Este desplazamiento en la tendencia del consumo de energía con carga alta se debe a que cada vez el calor que tiene que retirar el sistema es menor y el único calor que debe sacar el sistema es el que proviene de las paredes del cuarto de conservación debido a la diferencia de temperaturas existente entre ellos.

En las figura 75 se muestra que el consumo de energía aumenta con la reducción de la temperatura de referencia, con el aumento de la carga sobre el sistema al iniciarse la conservación y con el aumento de las perturbaciones que se hagan al ambiente interior (ambiente refrigerado).

El aumento de las perturbaciones sobre el medio ocasiona que la línea de consumo se desplace paralelamente a la línea de consumo sin perturbaciones para aumentar el consumo de energía proporcionalmente con el crecimiento de las fuentes de calor externas que afectan el medio refrigerado (ver figura 75).

6.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

6.5.1 Ventajas de la estrategia de continuo

1. La principal ventaja de la estrategia de control continuo es la permanencia de la temperatura del producto a la temperatura de referencia deseada sin importar posibles perturbaciones que puedan alterar la temperatura del ambiente refrigerado.

2. El uso de la estrategia de control continuo tiene como ventaja la considerable reducción en el consumo de energía respecto a otras estrategias de control, debido a que la potencia requerida para mover el compresor disminuye como consecuencia de la forma como se cambia la frecuencia de alimentación en los variadores de velocidad electrónicos.

En un controlador de velocidad electrónico, la tensión de alimentación al motor debe ser ajustada en proporción a la frecuencia, para mantener la corriente de magnetización constante.

La magnitud de esta corriente de magnetismo puede ser calculada así:

$$I_M = \frac{V}{2 * \pi * f * L} \quad (6.3)$$

V = Tensión de alimentación

f = Frecuencia de alimentación

L = Inductancia de magnetismo en el estator

Así con el propósito de mantener la corriente de magnetismo constante, al disminuir la frecuencia proporcionalmente debe disminuir el valor de la tensión (rms) y como se determinó experimentalmente (al cambiar la temperatura de referencia) a cualquier frecuencia de operación, el valor de la corriente activa (rms) es aproximadamente constante se presenta una disminución de la potencia demandada por el compresor y lógicamente en el tiempo un menor consumo de energía.

Esto quiere decir que adaptando la capacidad del sistema al valor necesario únicamente se garantiza un notable ahorro de energía que dependerá de lo sobredimensionado que se encuentre el compresor, de las condiciones ambientales en que se lleve a cabo el proceso de refrigeración y de la temperatura de referencia impuesta, la estrategia de control continuo permite trabajar el motor siempre en las condiciones óptimas de funcionamiento adaptando el tamaño del motor a las condiciones de trabajo.

En la medida en que se aumenta la temperatura de referencia el ahorro de energía se incrementa debido a que la frecuencia necesaria a la que debe operar el equipo es menor.

6.5.2 Desventajas de la estrategia de control continuo

1. El variador de velocidad convierte la corriente alterna en corriente continua mediante rectificadores y esto genera la aparición de corrientes o tensiones de frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental conocidas como componentes armónicos, la existencia de armónicos en la red de alimentación se traduce como una mala calidad del suministro eléctrico.

La existencia de componentes armónicos en la red tiene efectos negativos como:

- Incorrecta operación de equipos electrónicos que deben ser alimentados con una fuente perfectamente senoidal (comunicación y procesamiento de datos) que basan su funcionamiento en la determinación del cruce por cero de la onda de tensión.
- Mal funcionamiento de equipos de medida e instrumentación, los equipos que funcionan por inducción magnética están calibrados para la componente fundamental, por ello, desbalances en la fase causados por la distorsión armónica, causan errores de operación en estos dispositivos. Los

errores en la medida pueden ser tanto positivos como negativos dependiendo de la dirección del flujo de los armónicos.

- El mayor efecto de los armónicos de tensión y corriente tiene que ver con el incremento del calentamiento del motor del compresor debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro ocasionado por el incremento del valor eficaz de la corriente, esto provoca envejecimiento y daños prematuros del aislamiento del equipo.
- Los cables de transmisión sometidos a niveles ordinarios de corrientes armónicas sufren un aumento de la temperatura de trabajo debido al incremento del valor eficaz de la corriente y al aumento de la resistencia con la frecuencia (efecto piel).
- Los armónicos de corriente en la máquina incrementan el ruido emitido, generan torques pulsantes en el rotor de la máquina, aumentan el nivel de vibraciones de la máquina en todas las direcciones y causan interferencia en sistemas de comunicación.

7. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS

El desempeño de un sistema de refrigeración desde el punto de vista de la eficiencia con que usa la energía para los fines propuestos (sacar calor del ambiente interior) se ve reflejado en factores como el COP, la eficiencia volumétrica (η_V), la eficiencia mecánica (η_M) y la eficiencia del motor eléctrico (η_{ME}). Factores que combinados en el sistema de refrigeración afectan la capacidad del sistema y/o la potencia necesaria para mover el compresor lo que favorece un mayor o menor consumo de energía, por lo tanto se han tratado individualmente para explicar el comportamiento de cada una de las estrategias de control frente a estos factores.

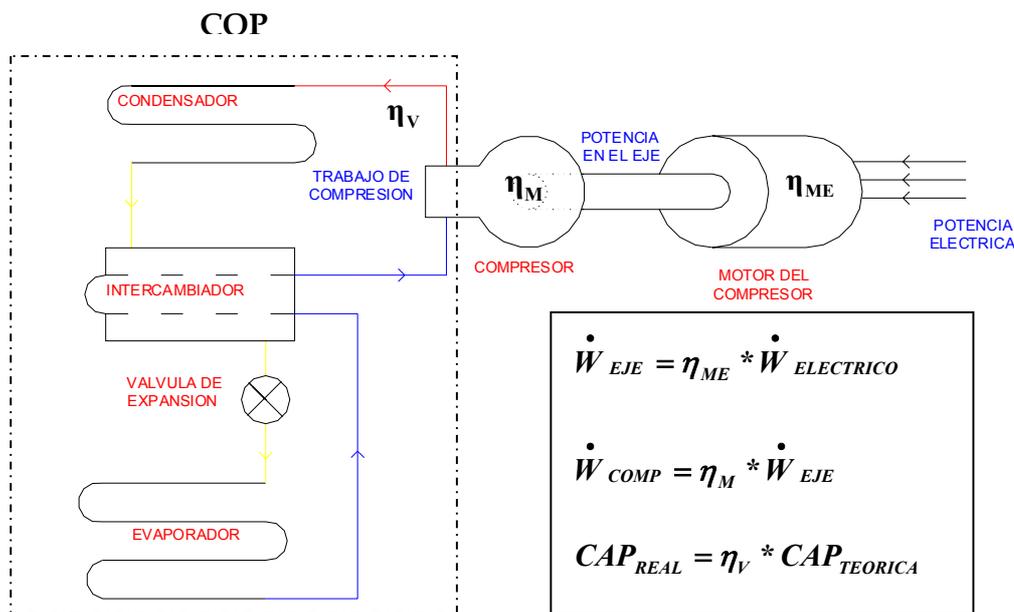


FIGURA 76 FACTORES QUE AFECTAN EL CONSUMO DE ENERGIA

7.1 COMPORTAMIENTO DEL COP

El coeficiente de operación (COP) es un índice de la potencia requerida por unidad de capacidad del sistema y como tal es una indicación de la eficiencia del ciclo de refrigeración, la eficiencia relativa de ambas estrategias de control se puede determinar comparando sus coeficientes de operación.

El coeficiente de operación es definido como el efecto refrigerante dividido por el trabajo de compresión:

$$COP = \frac{ER}{TRABAJO DE COMPRESION} \quad (7.1)$$

$$COP = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2')} \quad (7.2)$$

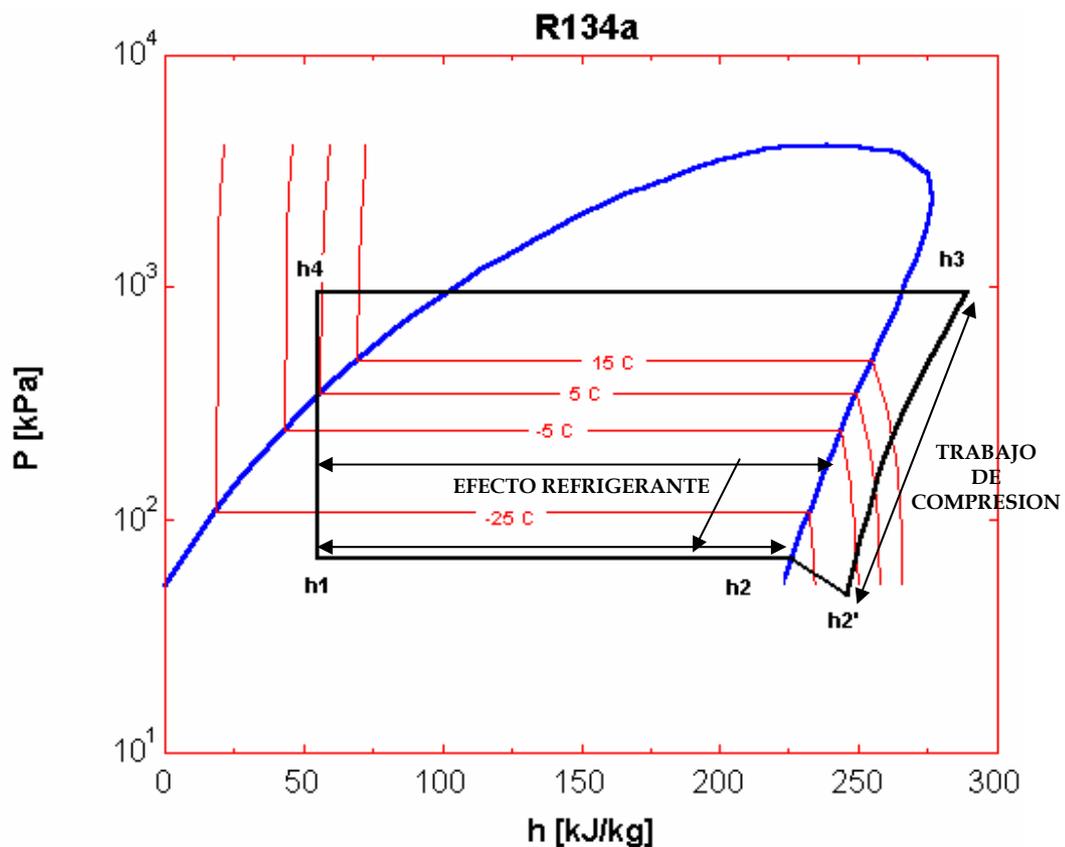


FIGURA 77 EL EFECTO REFRIGERANTE EN EL CICLO DE REFRIGERACION

7.1.1 Variación del COP con la temperatura de saturación del refrigerante. El coeficiente de operación varía considerablemente con la temperatura de saturación del refrigerante, la figura 77 muestra la disminución que tiene el efecto refrigerante y el aumento que se presenta en el trabajo de compresión con la reducción de la temperatura de saturación, lo cual indica que el coeficiente de operación y por lo tanto la eficiencia del ciclo disminuyen notablemente con la disminución de la temperatura de saturación.

El comportamiento de la temperatura de saturación del refrigerante es diferente para cada estrategia de control, para la estrategia de control on-off la temperatura del refrigerante presenta un estado transitorio que es ocasionado por el calentamiento al que se tiene lugar mientras se encuentran apagados los equipos del sistema de refrigeración, el estado transitorio de la temperatura se refiere a las temperaturas por las que pasa el refrigerante desde que se encienden los equipos hasta que se apagan nuevamente (ver figura 78). En la estrategia de control continuo el estado transitorio desaparece y la temperatura del refrigerante permanece aproximadamente constante como se muestra en la figura 80.

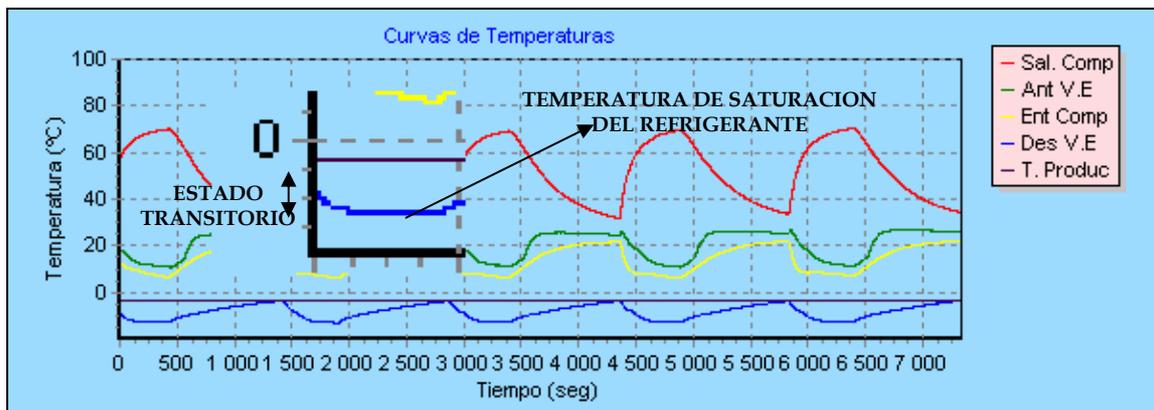


FIGURA 78 ESTADO TRANSITORIO DE LA TEMPERATURA DE SATURACION DEL REFRIGERANTE EN LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF PARA UNA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C, SIN PERTURBACIONES

Para cualquier temperatura de referencia dada, la temperatura de saturación del refrigerante promedio es menor cuando se utiliza una estrategia de control on-off

que cuando se utiliza una estrategia de control continuo (ver figuras 79 y 80) independiente de la carga a la que se encuentre el sistema, por lo tanto el efecto refrigerante es menor para la estrategia de control on-off que para la estrategia de control continuo. Para analizar este hecho se tuvo en cuenta que en la estrategia de control on-off el refrigerante presenta un estado transitorio mientras los equipos están encendidos, razón por la cual para esta estrategia se calculo el efecto refrigerante a la temperatura de saturación promedio y al apagarse el compresor (ultima temperatura de saturación), y se comparo con el efecto refrigerante a la temperatura de saturación constante que permanece el sistema cuando se utiliza la estrategia de control continuo, lo cual determino que el efecto refrigerante es menor para la estrategia de control on-off y es ocasionado por las menores temperaturas de saturación producto del diferencial de temperatura, lo cual establece que el COP según la temperatura de saturación del refrigerante es menor para la estrategia de control on-off que para la estrategia de control continuo.

Cuando se utiliza la estrategia de control on-off y se tiene una carga alta o un diferencial de temperatura grande, la temperatura de saturación última y la temperatura de saturación promedio del refrigerante son menores que lo que serian si hubiera carga baja ó si se tuviera un diferencial de temperatura pequeño (ver figuras 79,80,81), lo que implica una mayor disminución del efecto refrigerante con el aumento de la carga y con la ampliación de la diferencia de temperatura, esto lógicamente origina una disminución mayor del COP, situación que no sucede con la estrategia de control continuo, ya que el COP no varía con el aumento o la reducción de la carga debido a que cuando se alcanza el equilibrio térmico con cualquiera de las dos situaciones el valor de la temperatura de saturación es semejante para una misma temperatura de referencia.

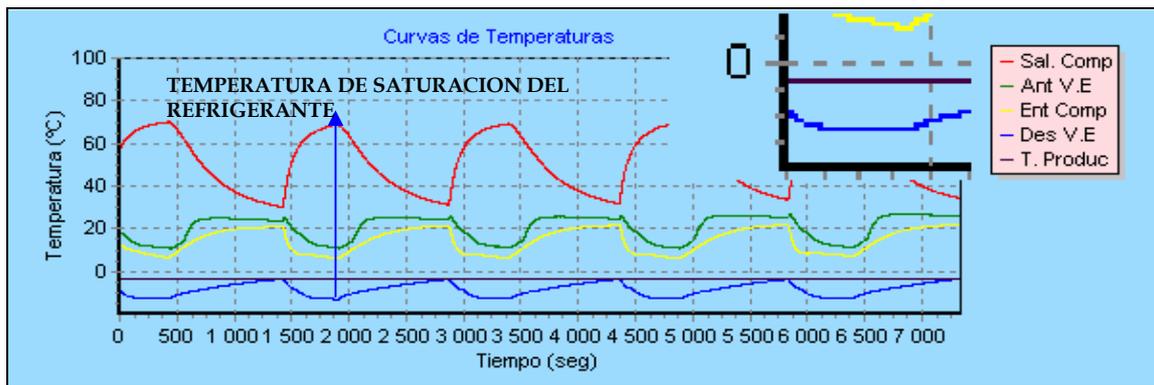


FIGURA 79 TEMPERATURAS DEL REFRIGERANTE CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y SIN PERTURBACIONES

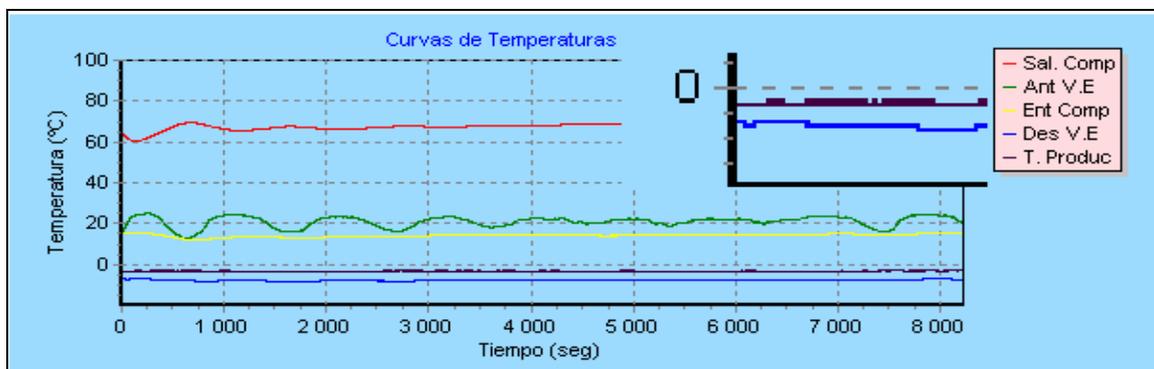


FIGURA 80 TEMPERATURAS DEL REFRIGERANTE CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y SIN PERTURBACIONES

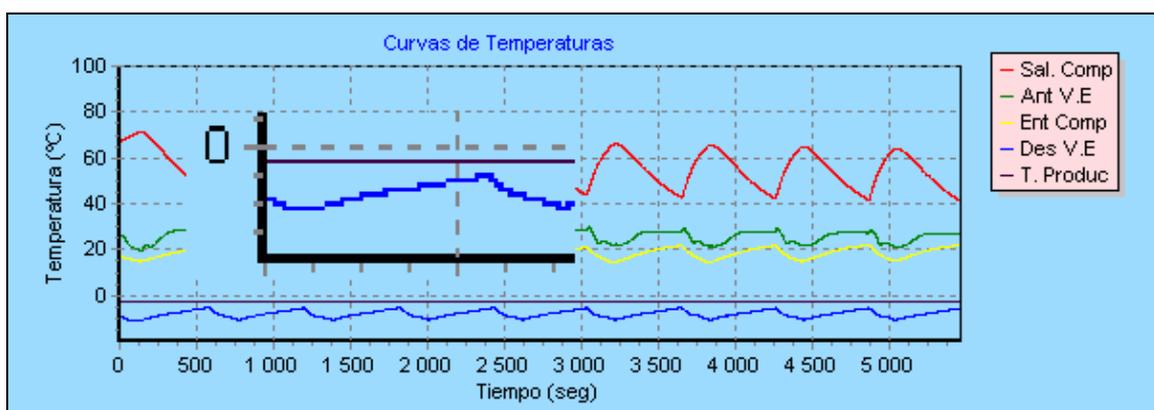


FIGURA 81 TEMPERATURAS DEL REFRIGERANTE CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF CON UNA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C Y SIN PERTURBACIONES

7.1.2 Variación del COP con la relación de compresión. Las relaciones de compresión que se presentan con la estrategia de control on-off son mayores que

con la estrategia de control continuo, lo que ocasiona que se presente un mayor trabajo de compresión con la estrategia de control on-off que con la estrategia de control continuo y una disminución con esto del COP.

7.1.3 Comparación del COP obtenido con la estrategia de control on-off contra la estrategia de control continuo. Para comparar el COP obtenido con las dos estrategias de control, se calculo para tres condiciones diferentes, a una temperatura de referencia de 0,-3 y -6 °C con una carga baja de producto, sin perturbaciones al ambiente interior del cuarto refrigerado y con una diferencia de temperatura de 2°C para la estrategia de control on-off.

COP_m = COP promedio (COP calculado a la Temperatura de saturación promedio) para la estrategia de control on-off.

COP_f = COP final (COP calculado a la temperatura de saturación un momento antes de apagarse el compresor) para la Estrategia de control on-off.

COP_{cc} = COP con la estrategia de control continuo

Tabla 5. COP Para una condición de carga baja

TEMPERATURA DE REFERENCIA	ON-OFF COP_m	ON-OFF COP_f	COP_{cc}
0	4.026	3.97	4.573
-3	4.016	3.90	4.363
-6	3.837	3.633	4.241

La disminución del COP cuando se tiene una condición de carga alta para la estrategia de control on-off es aproximadamente del 90% en la mayor parte de los casos.

Por ejemplo el COP para una temperatura de referencia de -6°C para una condición de carga alta es:

Tabla 6: COP para una condición de carga alta

TEMPERATURA DE REFERENCIA	ON-OFF COP _m	ON-OFF COP _f
-6	3.469	3.222

Como se ha visto, en cualquier caso el COP es mayor para la estrategia de control continuo que para la estrategia de control on-off, la diferencia con el COP variara dependiendo de la carga que se tenga.

7.2 EFECTOS EN LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

La eficiencia volumétrica (η_v) es la razón entre la masa real del gas comprimido y la masa del gas que podría ser comprimido si el volumen de admisión fuera igual al desplazamiento del pistón.

El efecto de la eficiencia volumétrica es la reducción de la capacidad del sistema de refrigeración, lo cual quiere decir que para sacar una misma cantidad de calor el compresor tendrá que permanecer prendido un tiempo mayor de lo que sería necesario si el volumen admitido fuera igual al volumen desplazado.

La eficiencia volumétrica puede ser expresada así:

$$\eta_v = 1 - C \left| \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right| \quad (7.3)$$

C = Factor de espacio muerto o claro del compresor, es la razón entre el volumen muerto y el desplazamiento del pistón:

$$C = \frac{V_d}{V_b - V_d} \quad (7.4)$$

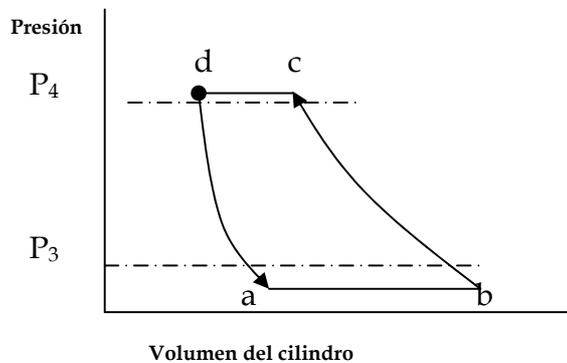


FIGURA 82 DIAGRAMA PRESIÓN-VOLUMEN DE UN COMPRESOR RECÍPROCANTE

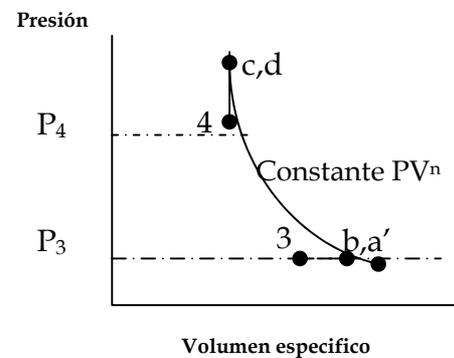


FIGURA 83 DIAGRAMA PRESIÓN VOLUMEN ESPECÍFICO DEL COMPRESOR

La expresión en la ecuación 7.3 describe el efecto del claro del compresor (lo que se conoce como eficiencia volumétrica teórica), sin embargo existen otros factores que también afectan la eficiencia volumétrica.

A continuación se enuncian los principales factores que influyen sobre la eficiencia volumétrica.

- Claro del compresor: debido al claro del compresor y a la compresibilidad del vapor refrigerante, el volumen del vapor de succión que entra al cilindro es menor que el volumen barrido por el pistón. Al final de cada carrera de compresión, una cierta cantidad de vapor permanece en el cilindro, en el espacio deseado después de cerradas las válvulas de descarga, ese vapor debe ser reexpandido a la presión de admisión antes de que puedan abrirse las válvulas de succión, y el pistón ya habrá completado parte de su carrera de llenado y el cilindro se encontrara parcialmente lleno con vapor de claro reexpandido.

- Estirado o arrastre: El vapor de succión experimenta una expansión de estrangulación ligera, o caída de presión, al pasar por las válvulas de succión y conductos del compresor. Por lo tanto, la presión del vapor de succión que llena el cilindro del compresor, siempre es menor que la presión del vapor en la línea de succión. Por lo tanto el volumen del vapor de succión, tomado de la línea de succión, en cada carrera, es menor que si el vapor que llena el cilindro estuviera a la presión de la línea de succión.
- Calentamiento del cilindro: El vapor de succión que entra al cilindro del compresor, se calienta por conducción de las paredes calientes del cilindro y por fricción, que resulta de la turbulencia en el vapor dentro del cilindro. El calentamiento causa la expansión del vapor después de que este entra al cilindro de manera que el cilindro se llenara con un peso menor de vapor, y por lo tanto se reducirá aun más el volumen del vapor tomado de la línea de succión.
- Fugas en válvulas y pistón: cualquier fuga de gas, a través de las válvulas, de descarga o succión, o en la periferia del pistón, reducirá el volumen del vapor, bombeado por el compresor.

Cuando se tienen en cuenta los otros factores que afectan la eficiencia volumétrica además del efecto del claro se dice que la eficiencia volumétrica es real, la expresión para la eficiencia volumétrica real se expresa a continuación:

$$\eta_v = 1 - k \left[\left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (7.5)$$

$$K > C$$

Los factores que influyen sobre la eficiencia volumétrica son función de la relación de compresión y de la velocidad de operación del compresor, luego la eficiencia volumétrica se vera afectada por el cambio de cualquiera de estos dos parámetros

(varia K en la ecuación 7.5), teniendo en cuenta que estos varían cuando se utiliza una estrategia de control continuo ó una estrategia de control on-off es importante evaluar el desempeño del compresor con cada parámetro en particular.

7.2.1 Cambio en la velocidad del compresor. Teóricamente si se aumenta la velocidad del compresor, el desplazamiento del pistón aumenta y el compresor desplaza un volumen mayor por unidad de tiempo, suponiendo que la eficiencia volumétrica del compresor permanece constante.

Sin embargo la eficiencia volumétrica del compresor no permanece constante si se cambia la velocidad, la variación es producida principalmente por cambios en los efectos de arrastre, calentamiento del cilindro y fugas de gas a través de las válvulas de succión y descarga hechos que hacen que aumente el factor K en la ecuación (7.5).

7.2.1.1 efectos del cambio de velocidad en el efecto de arrastre. El estirado es una función de la velocidad del vapor de refrigerante que fluye a través de las válvulas y pasos del compresor. Al aumentar la velocidad del vapor a través de las válvulas el efecto de estirado aumenta, el efecto de arrastre es mínimo a bajas velocidades.

El análisis anterior indica que cuando se usa la estrategia de control on-off el efecto de arrastre es considerado debido a que el compresor funciona a su máxima velocidad. El efecto de arrastre con la estrategia de control continuo es despreciable debido a las bajas velocidades en que opera esta estrategia.

7.2.1.2 efectos del cambio de velocidad en el calentamiento de cilindro. El calentamiento del cilindro es mayor a velocidades bajas de compresor, lo que quiere decir que con la estrategia de control continuo se presenta un mayor calentamiento del cilindro que con la estrategia de control on-off.

7.2.1.3 efectos del cambio de velocidad en las fugas en pistones y válvulas. La cantidad que representan las fugas a través de las válvulas, en porcentaje por metro cúbico de vapor desplazado, es mayor a velocidades bajas de compresor. Disminuyendo al aumentar la velocidad. Lo que quiere decir que con la estrategia de control on-off se tiene un menor efecto en las fugas que con la estrategia de control continuo.

7.2.2 Cambio en la relación de compresión del compresor.

7.2.2.1 efectos en el claro. Si se aumenta la presión de descarga, el vapor en el claro se comprimirá a una presión mayor y se requiera una mayor reexpansión, para reducirlo a la presión de succión. Igualmente si se reduce la presión de succión, el vapor del claro deberá sufrir una reexpansión mayor, para adoptar los valores de baja presión necesarios para que abran las válvulas de succión.

La presión de descarga es mayor y la presión de succión es menor cuando el compresor es operado con la estrategia de control on-off (se tienen mayores relaciones de compresión) que cuando se utiliza la estrategia de control continuo, lo cual quiere decir que el efecto en el claro es mas intenso cuando el compresor es operado con la estrategia de control on-off que cuando se opera con la estrategia de control continuo.

- Por ejemplo para una temperatura de referencia de 0°C operando el compresor con la estrategia de control on-off la temperatura de saturación promedio del refrigerante fue de -2.4 °C, la presión de alta fue de 120 Psi y la presión de baja fue de 15 Psi, luego la relación de compresión es 8. Operando el compresor con la estrategia de control continuo para la misma temperatura de referencia la temperatura de saturación del refrigerante fue

de -1°C , la presión de alta 100 Psi y la presión de baja 20 Psi, la relación de compresión es 5.

7.2.2.2 efectos en el calentamiento del cilindro. Con relaciones de compresión elevadas, el trabajo es mayor y la temperatura de descarga mas elevada. Esto causa una elevación en la temperatura de las paredes del cilindro y otras partes del compresor, de manera que la transferencia de calor al vapor de succión, ocurre más rápidamente.

7.2.2.2 efectos en las fugas. Para un compresor dado, la cantidad de fuga a través de las válvulas es función de la relación de compresión, mientras mayor sea la relación de compresión, mayor será la cantidad de fuga en las válvulas.

7.2.3 Calculo de la eficiencia volumétrica total. Los efectos combinados de todos los factores anteriores sobre la eficiencia volumétrica del compresor, varían con el diseño de este y con el refrigerante empleado. Además que para un compresor dado la eficiencia volumétrica no es una cantidad constante, cambia con las condiciones de operación del sistema.

Para calcular el efecto del cambio en la velocidad del compresor sobre la eficiencia volumétrica teniendo en cuenta todos los factores involucrados en este hecho, la figura 84 muestra su efecto en un compresor típico utilizando refrigerante 134^a.

La eficiencia volumétrica al aumentar las revoluciones del compresor disminuye como se muestra en la figura 84 dependiendo de las presiones de succión y descarga que a las que se encuentre el compresor. Si observamos la grafica podemos concluir que cuando el equipo se encuentra a su máxima velocidad (1800 RPM estrategia de control on-off) a la menor presión de descarga de la grafica, la eficiencia volumétrica es del 65% y a menores velocidades (estrategia de control continuo) es del 68%.

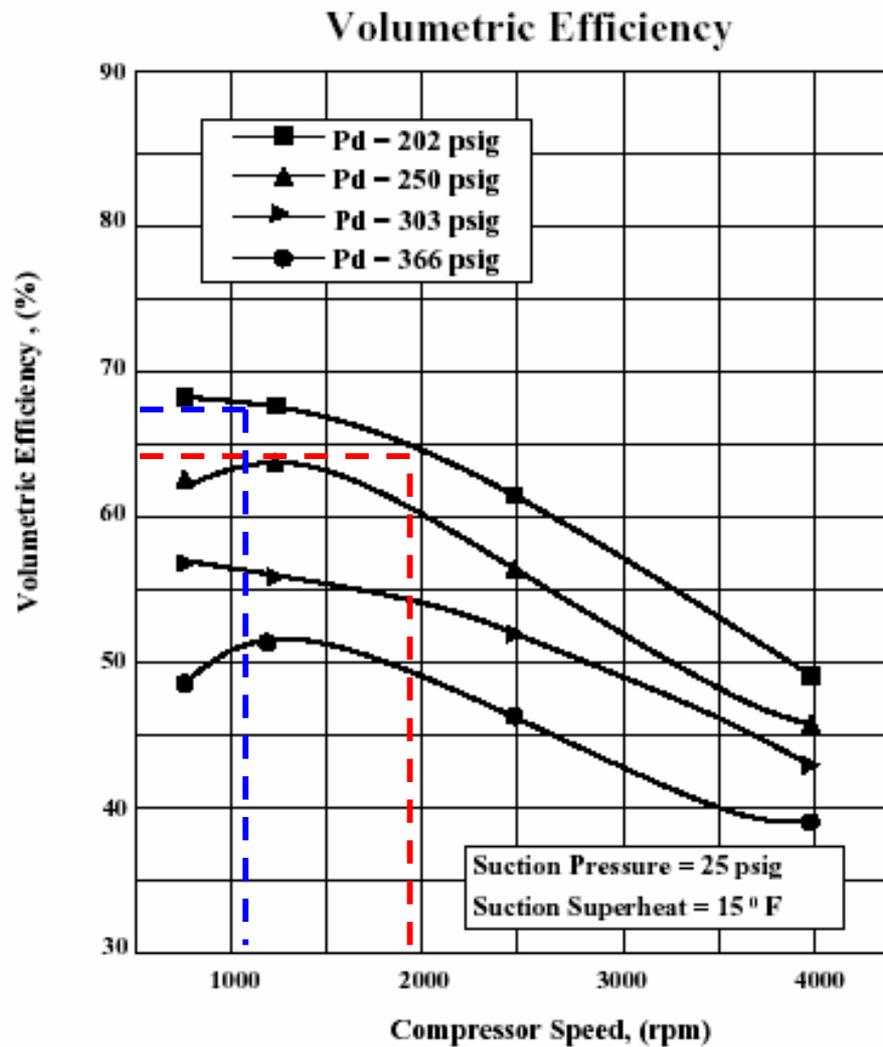


FIGURA 84 EFECTO DEL CAMBIO EN LAS REVOLUCIONES DEL COMPRESOR SOBRE LA EFICIENCIA VOLUMETRICA PARA UN COMPRESOR TIPICO UTILIZANDO R134a

El aumento en la relación de compresión también disminuye la eficiencia volumétrica, la figura 85 muestra su resultado para un compresor típico utilizando R134a y se puede ver con facilidad que el efecto que tiene el cambio en la relación de compresión sobre la eficiencia volumétrica es más grande que el efecto que tiene el cambio en la velocidad del compresor.

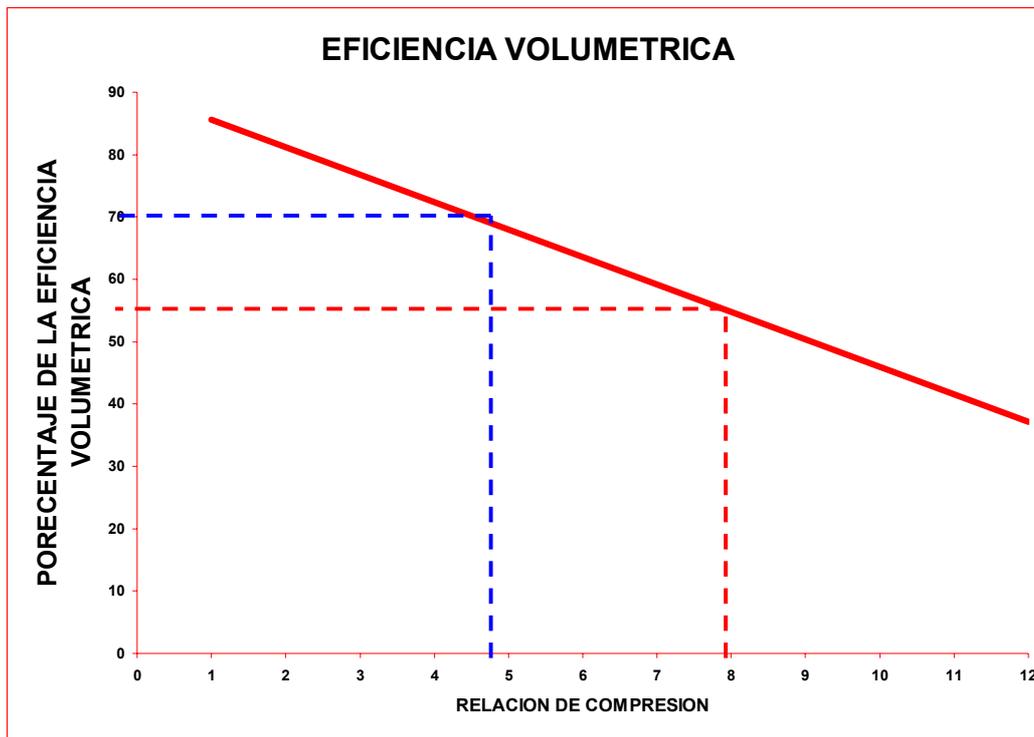


FIGURA 85 EFECTO DEL CAMBIO EN LA RELACION DE COMPRESION SOBRE LA EFICIENCIA VOLUMETRICA PARA UN COMPRESOR TIPICO UTILIZANDO R134a

Teniendo en cuenta que en la estrategia de control on-off el compresor tiene la velocidad máxima y a su vez se presentan relaciones de compresión mayores, se concluye que *la eficiencia volumétrica con la estrategia de control on-off es menor que la eficiencia volumétrica con la estrategia de control continuo.*

- Retomando el ejemplo anterior para una temperatura de referencia de 0°C en el que la relación de compresión para la estrategia de control on-off fue de 8 y la relación de compresión para la estrategia de control continuo fue de 5, la eficiencia volumétrica debido al cambio en la relación de compresión según la grafica x es:

Para la estrategia de control on-off $\eta_{vrc} = 0.55$

Para la estrategia de control continuo $\eta_{vrc} = 0.7$

Teniendo en cuenta el cambio en la velocidad del compresor

Para la estrategia de control on-off $\eta_{v_v} = 0.65$

Para la estrategia de control continuo $\eta_{v_v} = 0.68$

Como una aproximación a la eficiencia volumétrica total de funcionamiento, se tiene en cuenta la menor de las eficiencias, para este caso resulta:

Para la estrategia de control on-off $\eta_{v_T} = 0.55$

Para la estrategia de control continuo $\eta_{v_T} = 0.68$

7.3 EFECTOS EN LA EFICIENCIA MECÁNICA.

La eficiencia mecánica es función de la velocidad del compresor y del torque exigido al equipo. La fricción mecánica en el compresor varia con la velocidad, si consideramos una velocidad fija del compresor (velocidad máxima) se sigue que la eficiencia mecánica del compresor depende totalmente de lo cargado que se encuentre (alto o bajo torque), y será máxima cuando el compresor se encuentre totalmente cargado. Así la eficiencia mecánica variara con el sistema y se reducirá al disminuir la temperatura de saturación del refrigerante.

La figura 86 muestra la eficiencia mecánica típica para compresores de refrigeración pequeños (<10 Hp) e indica la reducción que se presenta al disminuir la temperatura de referencia (menores presiones de succión) manteniendo constantes las revoluciones del compresor.

Como las revoluciones en realidad no permanecen constantes, es necesario indicar el efecto que tienen sobre la eficiencia mecánica. El aumento en las revoluciones del compresor produce una disminución de la eficiencia mecánica del compresor, disminución que es el resultado del aumento en la fricción mecánica del compresor al aumentar la velocidad de este, pero el aumento en la fricción mecánica solo es significativo a velocidades de operación muy elevadas, en este caso el cambio en la

fricción mecánica no es significativo debido al rango de velocidades en que se trabaja el compresor. Sin embargo en la estrategia de control on-off el continuo arranque del compresor si perjudica la eficiencia mecánica ya que la fricción en estas condiciones si es muy elevada.

Las presiones de succión que se manejan con la estrategia de control on-off son menores que las presiones de succión cuando se tiene una estrategia de control continuo, al mirar la figura 86 a continuación se considera que la eficiencia mecánica del compresor será mayor cuando se tiene una estrategia de control continuo que cuando se tiene una estrategia de control on-off y además si se tiene en cuenta la ineficiencia que se presenta al arrancar continuamente el compresor y el poco efecto que tiene el trabajar el compresor a una mayor velocidad, la eficiencia mecánica de la estrategia de control on-off será menor que la eficiencia mecánica con la estrategia de control continuo.

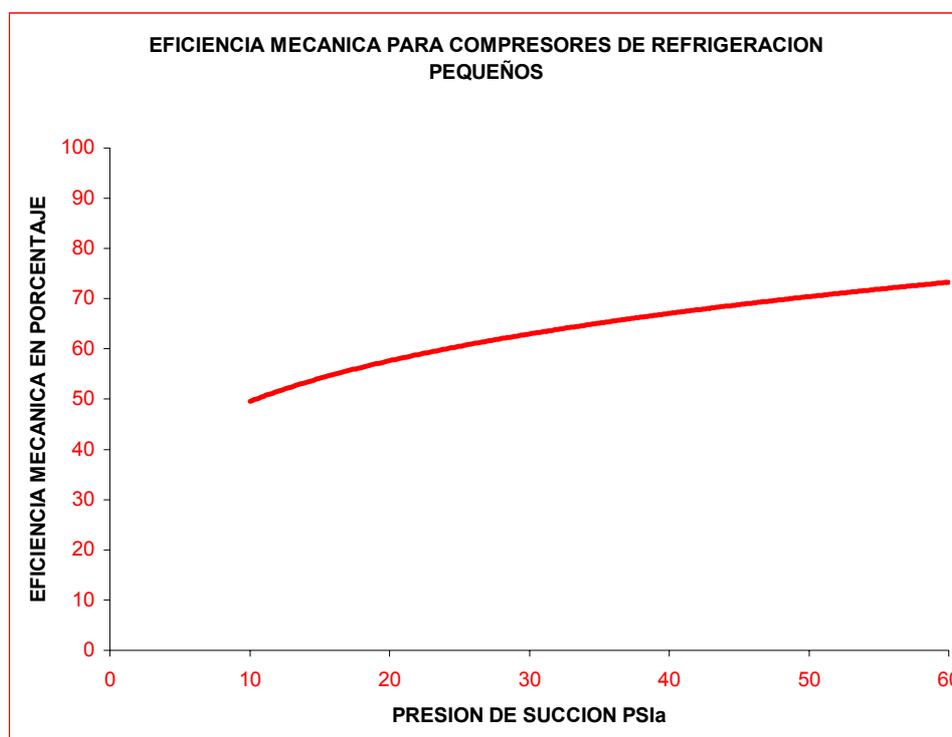


FIGURA 86 EFICIENCIA MECANICA DEL COMPRESOR AL BAJAR LA TEMPERATURA DE EVAPORACION PARA UN COMPRESOR A VELOCIDAD CONSTANTE

7.4 EFECTOS EN LA EFICIENCIA DEL MOTOR ELÉCTRICO

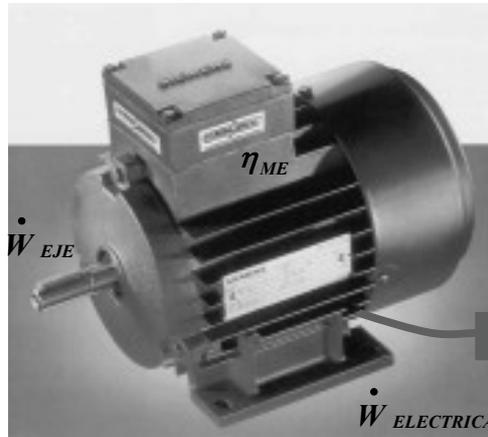


FIGURA 87 MOTOR ELECTRICO DE INDUCCION

La eficiencia de los motores eléctricos es función del torque exigido por el sistema, cuando se reduce demasiado, el motor tendrá valores muy desfavorables en su eficiencia.

En la medida que disminuye la temperatura de referencia que se requiere para un caso dado, la temperatura de saturación del refrigerante es aun menor, y con esto la potencia demandada por el compresor (ver figura 2), lo cuál quiere decir que en un sistema de refrigeración la potencia consumida por el compresor disminuye naturalmente con la reducción de la temperatura de saturación del refrigerante, si las revoluciones del compresor son las máximas (control on-off) al disminuirse la potencia consumida por el equipo el torque que entrega el equipo deberá disminuirse significativamente y con ello la eficiencia del motor eléctrico, situación que no ocurre con la estrategia de control continuo, ya que esta estrategia adapta las revoluciones del compresor a las necesarias únicamente y mantiene el torque del equipo en su máximo valor. Así la eficiencia del motor eléctrico cuando se utiliza la estrategia de control continuo tendrá siempre su valor más alto.

Por lo cual la eficiencia del motor eléctrico cuando se utiliza una estrategia de control continuo es siempre mayor que la eficiencia cuando se tiene una estrategia de control on-off.

La figura 88 muestra el valor del rendimiento típico y el factor de potencia para motores eléctricos cuya potencia nominal este entre 0.1-1000 KW.

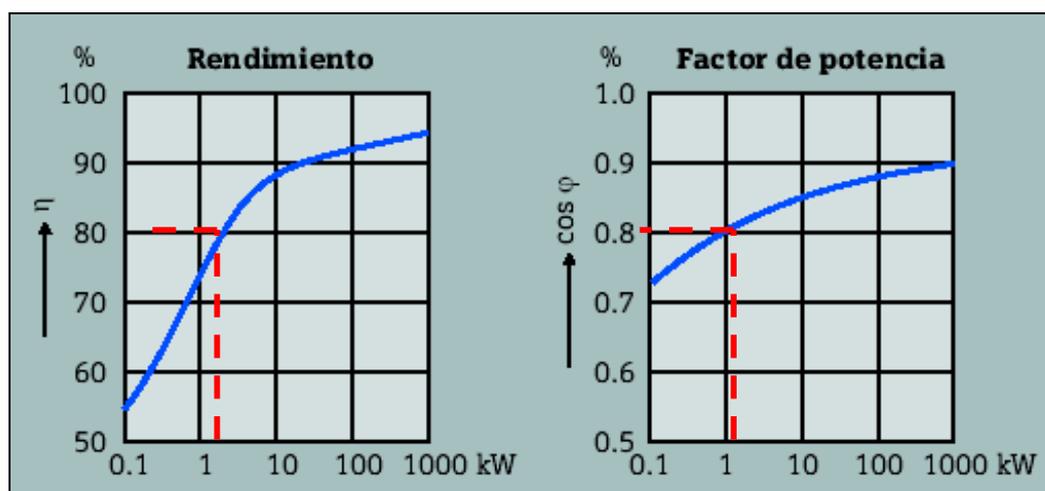


FIGURA 88 VALORES DE EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA TÍPICOS PARA MOTORES ELECTRICOS TIPO JAULA DE ARDILLA

Para un compresor de 1.8 Hp como el CS12K6E-TF5 el valor de la eficiencia máxima es del 80% y el máximo factor de potencia es 0.8.

La importancia del factor de potencia esta en los valores máximos de corriente permisibles en las líneas, ya que para valores bajos de factor de potencia, para producir la misma potencia circulara una corriente de mayor valor que la que circularía si se tuviera un mayor factor de potencia.

En la tabla 7 y 8 se indican los valores de eficiencia y factor de potencia a los que estaría el equipo bajo una condición de carga parcial (bajo torque).

Tabla 7 rendimiento bajo condiciones de carga parcial.

Rendimiento en % a la carga parcial de:			
1/2	3/4	4/4	5/4
de la carga nominal			
93.5	95	95	94.5
92.5	94	94	93.5
91.5	93	93	92.5
91	92	92	91.5
90	91	91	90
89	90	90	89
88	89	89	88
87	88	88	87
86	87	87	86
85	86	86	85
84	85	85	83.5
83	84	84	82.5
82	83	83	81.5
81	82	82	80.5
80	81	81	79.5
79	80	80	78.5
77	79.5	79	77.5
75.5	78.5	78	76.5
74	77.5	77	75
73	76	76	74
72	75	75	73
71	74	74	72
70	73	73	71
68	72	72	70
67	71	71	69
66	70	70	68
65	69	69	67
64	67.5	68	66
62	66.5	67	65
61	65	66	64
60	64	65	63
59	63	64	62
57	62	63	61
56	60.5	62	60.5
55	59.5	61	59.5
54	58.5	60	58.5
53	58	59	57
52	57	58	56
51	55	57	55
49	54	56	54
47	52	55	53
46	51	54	52
45	50	53	51

Tabla 8 factor de potencia bajo condiciones de carga parcial.

Factor de potencia (cos j) a la carga parcial de:			
1/2	3/4	4/4	5/4
de la carga nominal			
0.83	0.88	0.90	0.90
0.80	0.86	0.89	0.89
0.78	0.85	0.88	0.88
0.76	0.84	0.87	0.87
0.75	0.83	0.86	0.86
0.73	0.81	0.85	0.86
0.71	0.80	0.84	0.85
0.69	0.79	0.83	0.84
0.67	0.77	0.82	0.83
0.66	0.76	0.81	0.82
0.65	0.75	0.80	0.81
0.63	0.74	0.79	0.80
0.61	0.72	0.78	0.80
0.59	0.71	0.77	0.79
0.58	0.70	0.76	0.78
0.56	0.69	0.75	0.78
0.55	0.68	0.74	0.77
0.54	0.67	0.73	0.76
0.52	0.63	0.72	0.77
0.50	0.62	0.71	0.76

7.5 COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS QUE SE OBTIENEN CON CADA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN CASO PARTICULAR.

Tabla 9. Comparación de las eficiencias obtenidas con las dos estrategias de control para una condición de Temperatura de referencia -3°C , Sin perturbaciones y Carga alta.

EFICIENCIA	ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF	ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO
COP	3.9	4.3
Eficiencia Volumétrica η_{VT}	55%	65%
Eficiencia Mecánica η_M	52%	58%
Eficiencia del motor eléctrico η_{ME}	79%	80%

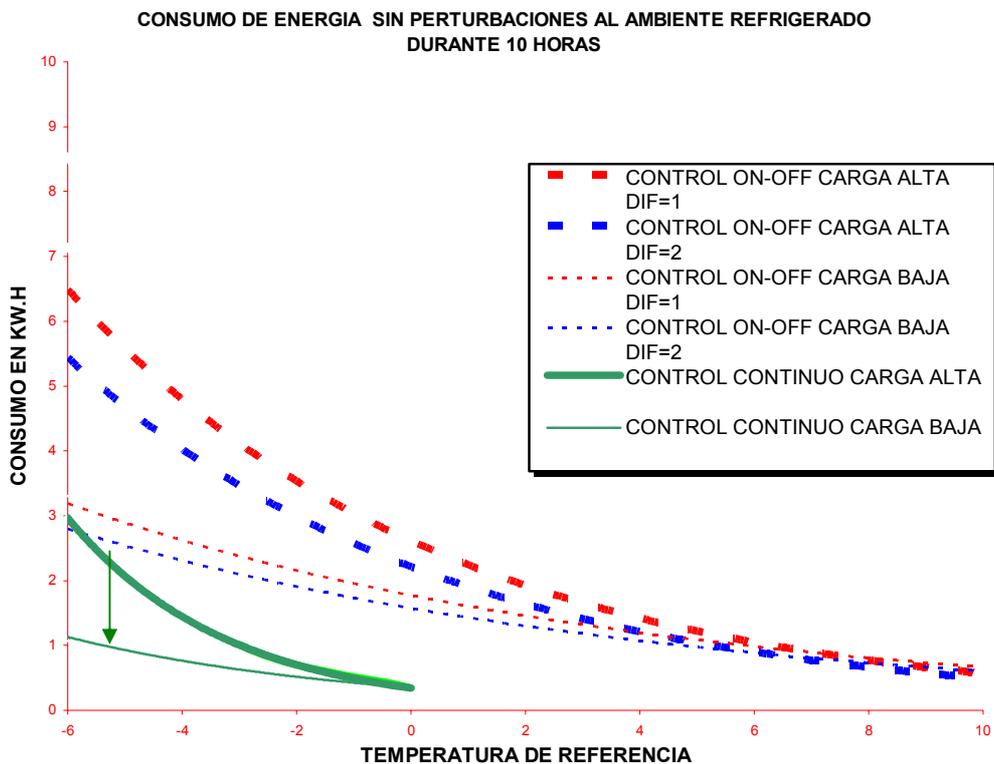
8. CONSUMO DE ENERGIA AL UTILIZAR UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO CON RESPECTO A LA UTILIZACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Al estudiar el consumo de energía bajo los diferentes escenarios de trabajo planteados anteriormente con cada una de las estrategias de control se encontraron los valores del consumo mostrados en la tabla 10, se halló la tendencia del consumo de energía, se investigaron las causas que originaron el aumento en el consumo en las dos estrategias y la razón por la cual se consume mas energía en una estrategia de control con respecto a la otra.

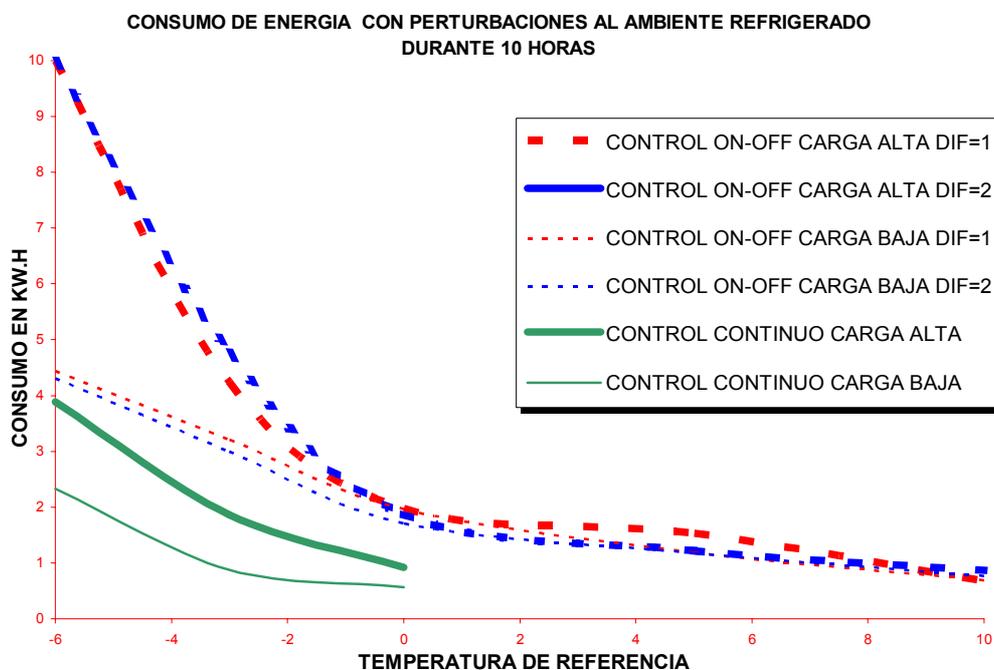
8.1 TENDENCIA EN EL CONSUMO DE ENERGÍA

Para tener un mejor criterio de comparación la tendencia del consumo de energía con cada una de las estrategias de control se dividió de acuerdo a si era objeto o no de perturbaciones el ambiente interior.

8.1.1 Sin perturbaciones. La figura 89 muestra la tendencia del consumo de energía con cada una de las estrategias de control cuando no hay perturbaciones sobre el medio y es notable que *el mayor consumo se presenta con la estrategia de control on-off y que con cualquiera de las dos estrategias de control el consumo se incrementa como consecuencia de cambios en las condiciones de conservación del producto como la disminución de la temperatura de referencia y el aumento en la carga de enfriamiento.*



GRAFICA 89 TENDENCIA DEL CONSUMO DE ENERGIA SIN PERTURBACIONES AL MEDIO INTERIOR PARA TODOS LOS ESCENARIOS ESTABLECIDOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO



GRAFICA 90 TENDENCIA DEL CONSUMO DE ENERGIA CON PERTURBACIONES AL MEDIO INTERIOR PARA TODOS LOS ESCENARIOS ESTABLECIDOS CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

CONSUMO DE ENERGÍA EN KW.h PARA UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO vs ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF EN 10 HORAS DE CONSERVACIÓN					
	CONTROL ON-OFF DIF=1 AMBI	CONTROL ON-OFF DIF=2 AMBI	CONTROL CONTINUO	AHORRO DE ENERGÍA CONTROL CONTINUO vs CONTROL ON-OFF DIF=1	AHORRO DE ENERGÍA CONTROL CONTINUO vs CONTROL ON-OFF DIF=2
T = -6 CA SP	8.55	7.15	2.959	189%	141%
T = -3 CA SP	3.74	3.54	1.012	269%	249%
T = 0 CA SP	1.763	1.405	0.341	417%	312%
T = 5 CA SP	1.4152	1.02	0	0	0
T = 10 CA SP	0.608	0.594	0	0	0
T = -6 CB SP	3.3	2.93	1.07	208%	173%
T = -3 CB SP	2.53	2.28	0.701	260%	225%
T = 0 CB SP	1.5746	1.32	0.332	374%	297%
T = 5 CB SP	1.05	0.962	0	0	0
T = 10 CB SP	0.7037	0.6421	0	0	0
T = -6 CA CP	10	10	3.884	157%	157%
T = -3 CA CP	4.24	4.76	1.862	127%	155%
T = 0 CA CP	1.978	1.8746	0.924	114%	102%
T = 5 CA CP	1.5362	1.2159	0	0	0
T = 10 CA CP	0.6818	0.8615	0	0	0
T = -6 CB CP	4.44	4.31	2.332	90%	84%
T = -3 CB CP	3.205	3	0.88	264%	240%
T = 0 CB CP	1.9787	1.704	0.567	248%	200%
T = 5 CB CP	1.1862	1.1753	0	0	0
T = 10 CB CP	0.684	0.769	0	0	0

8.1.2 Con perturbaciones. En la figura 90 se observa la tendencia del consumo de energía cuando se perturba el ambiente interior y se observa que las curvas aumentaron su pendiente con relación a las curvas de la figura 89 lo que está indicando un mayor consumo de energía con esta condición.

8.2 VALORES DEL CONSUMO DE ENERGÍA CON TODOS LOS ESCENARIOS PLANTEADOS.

Tabla 10. La tabla 10 presenta el consumo de energía con cada estrategia y los porcentajes de ahorro posibles si la estrategia utilizada hubiera sido la estrategia de control continuo.

8.3 CONDICIONES QUE INCREMENTAN EL CONSUMO DE ENERGÍA EN CUALQUIER ESTRATEGIA DE CONTROL

Cuando la carga térmica sobre el sistema se incrementa debido a cualquier circunstancia, el equipo de refrigeración deberá trabajar por un tiempo más prolongado ó a una frecuencia de operación mayor para sacar todo ese calor agregado, luego el costo de esta condición es el aumento en el consumo de energía, hay condiciones de trabajo que necesariamente aumentan la carga térmica del sistema como la disminución de la temperatura de referencia, el aumento en la carga y el hecho de perturbar el ambiente interior del cuarto regularmente.

Mediante un balance de energía estableciendo como volumen de control el ambiente interior del cuarto de conservación (como se muestra en la figura 91) se analizará la transferencia de calor para cada estrategia de control con el fin de explicar las razones por las cuales se presenta el aumento en el consumo de energía con cada condición de trabajo.

- Con la estrategia de control on-off

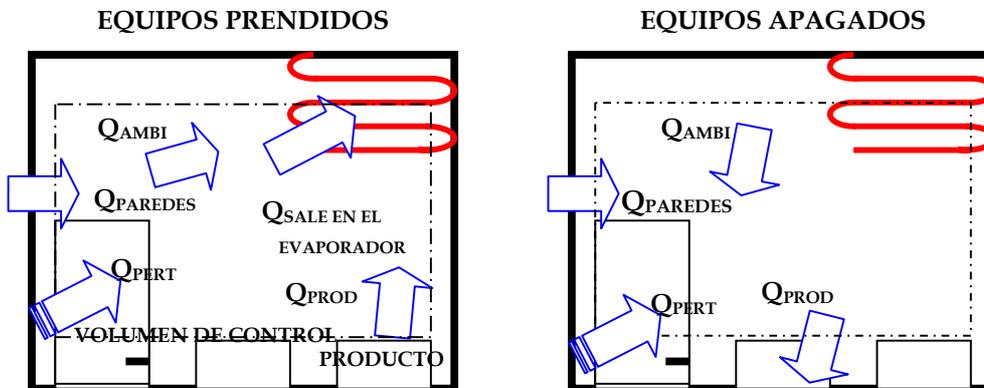


FIGURA 91 CONSERVACION DE LA ENERGIA EN EL VOLUMEN DE CONTROL CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

✚ Mientras los equipos están prendidos. El calor que entrega el producto mas el flujo de calor que se filtra por las paredes por el tiempo junto con el calor que entrega el aire del ambiente interior mas un calor intermitente producto de las perturbaciones originadas al ambiente interior es igual al calor que saca el evaporador por unidad de tiempo mientras esta prendido.

$$(\dot{Q}_{PAREDES} * t) + m_{PROD} C_p \Delta T_{PROD} + m_{AIRE} C_p \Delta T_{AIRE} + \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT} = (\dot{Q}_{EVAPORADOR} * t) \quad (8.1)$$

Despejando t de la ecuación 8.1 resulta que el tiempo que duran prendidos los equipos es:

$$t_{PRENDIDOS} = \frac{m_{PROD} C_p \Delta T_{PROD} + m_{AIRE} C_p \Delta T_{AIRE} + \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT}}{\dot{Q}_{EVAPORADOR} - \dot{Q}_{PAREDES}} \quad (8.2)$$

Reemplazando el flujo de calor de las paredes resulta:

$$t_{PRENDIDOS} = \frac{m_{PROD} C_p \Delta T_{PROD} + m_{AIRE} C_p \Delta T_{AIRE} + \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT}}{\dot{Q}_{EVAPORADOR} - U * A_{EXT} * (T_{AMBI} - T_{REF})} \quad (8.3)$$

Teniendo en cuenta que el flujo de calor que saca el evaporador es igual a la capacidad del sistema de refrigeración, el tiempo que permanecen prendidos los equipos es igual a:

$$t_{PRENDIDOS} = \frac{m_{PROD} C_p \Delta T_{PROD} + m_{AIRE} C_p \Delta T_{AIRE} + \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT}}{CAP - U * A_{EXT} * (T_{AMBI} - T_{REF})} \quad (8.4)$$

✚ Mientras los equipos están apagados el balance de energía arroja el siguiente resultado:

$$t_{APAGADOS} = \frac{m_{PROD} C_p \Delta T_{PROD} + m_{AIRE} C_p \Delta T_{AIRE} - \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT}}{\dot{Q}_{PAREDES}} \quad (8.5)$$

$$t_{APAGADOS} = \frac{m_{PROD} C_p \Delta T_{PROD} + m_{AIRE} C_p \Delta T_{AIRE} - \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT}}{U * A_{EXT} * (T_{AMBI} - T_{REF})} \quad (8.6)$$

- Con la estrategia de control continuo

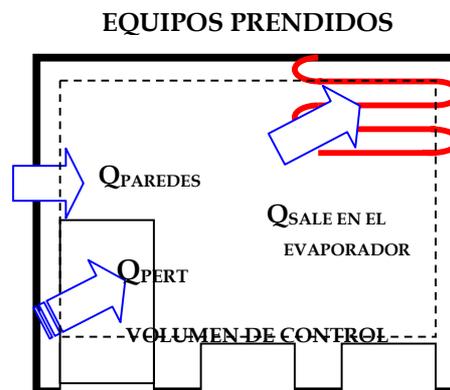


FIGURA 92 CONSERVACION DE LA ENERGIA EN EL VOLUMEN DE CONTROL CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

El análisis de la transferencia de calor al utilizar la estrategia de control continuo se hizo estableciendo que el ambiente interior se encontraba en equilibrio térmico con el producto en conservación, entonces el calor que saca el evaporador sería igual a:

$$Q_{EVAPORADOR} = \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT} + Q_{PAREDES} \quad (8.7)$$

$$Q_{EVAPORADOR} = \dot{Q}_{PERT} * t_{PERT} + U * A_{EXT} * (T_{AMBI} - T_{REF}) \quad (8.8)$$

A continuación se explican las razones por las cuales las condiciones de trabajo generan un consumo de energía mayor.

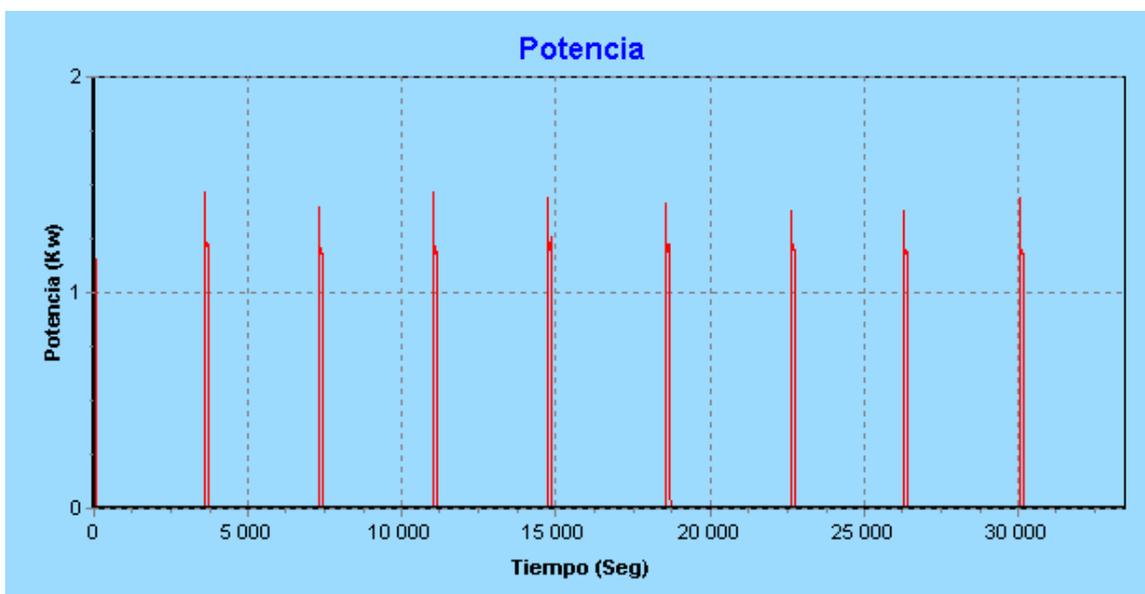
8.3.1 Disminución de la temperatura de referencia. Al disminuirse la temperatura de referencia la transferencia de calor entre el ambiente exterior y el ambiente interior mejora como consecuencia del aumento en la diferencia de sus temperaturas, lo cual hace que la carga térmica aumente y el sistema de refrigeración tenga que sacar una mayor cantidad de calor.

- Si la estrategia utilizada es la de control on-off. El tiempo que dura descansando el equipo será menor con una temperatura de referencia baja que con una temperatura de referencia alta (ver ecuación 8.6) y el tiempo

que permanece encendido el equipo igualmente será mayor (ver ecuación 8.4) para una temperatura de referencia baja (como se muestra en las figuras 93, 94, 95), condición que favorece el aumento en el consumo de energía.

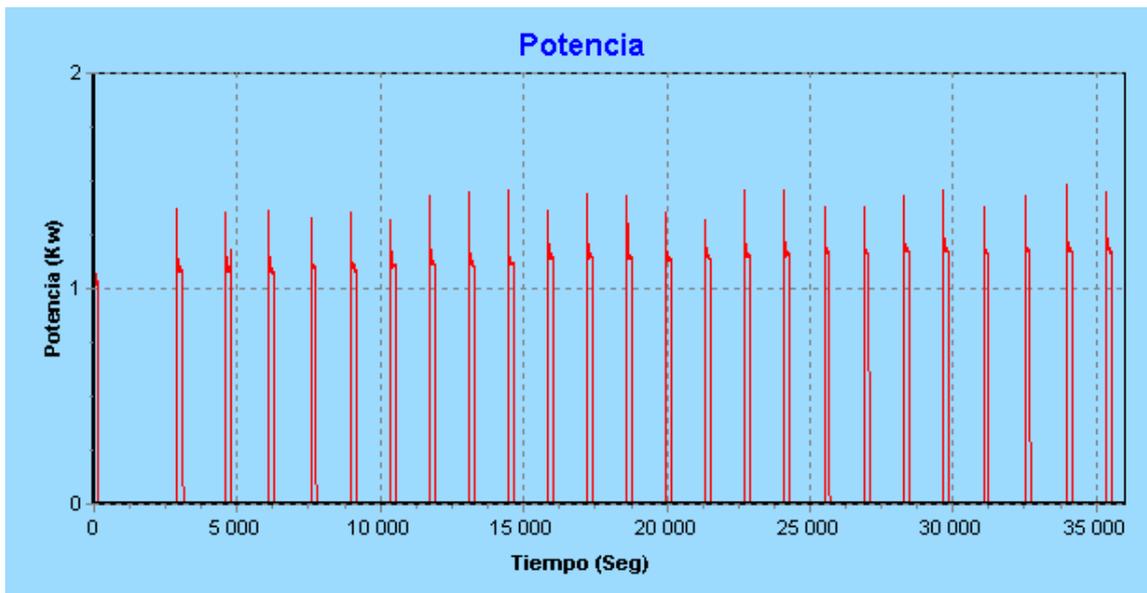
- Con la estrategia de control continuo. Al aumentarse la carga térmica el calor que deberá salir por el evaporador se incrementa (ver ecuación 8.8), la estrategia de control responde a esta condición aumentando la frecuencia de alimentación del compresor (ver figuras 96, 97, 98) para que la capacidad del sistema de refrigeración sea igual a la carga térmica existente. El aumento en la frecuencia de alimentación lógicamente genera un mayor consumo de energía.

Las figuras de la 93 a la 98 ilustran el comportamiento típico de cada una de las estrategias de control y presentan la manera como responden a la variación de las condiciones de conservación.



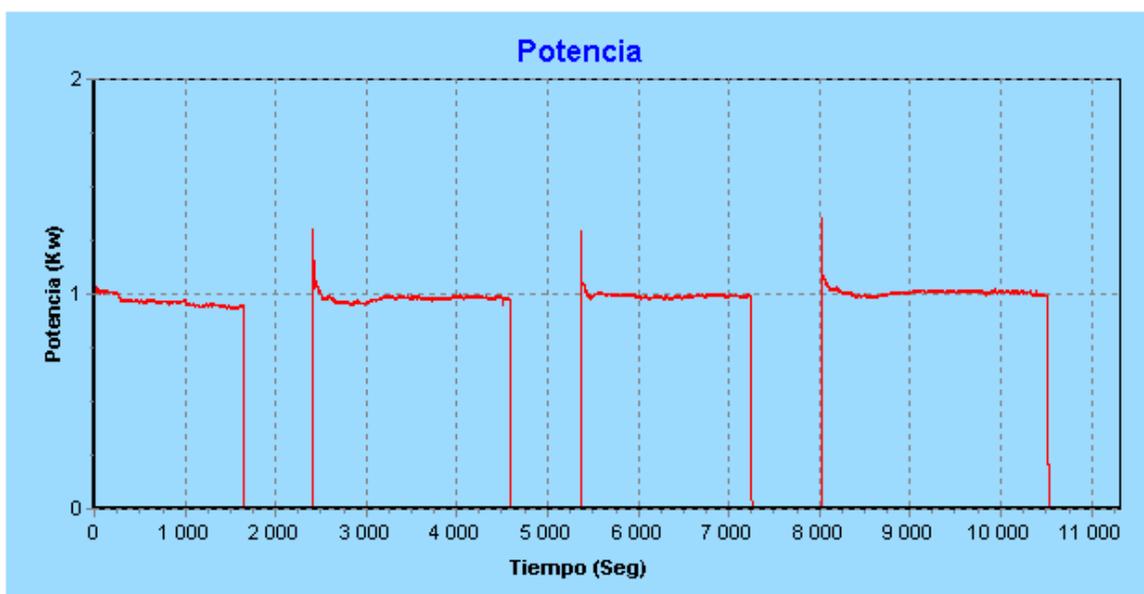
ENERGIA CONSUMIDA EN 10 HORAS 0.594 KW.h

FIGURA 93 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE 10°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 2°C CON LA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF



ENERGIA CONSUMIDA EN 10 HORAS 1.405 KW.h

GRAFICA 94 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE 0°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 2°C CON LA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF



ENERGIA CONSUMIDA EN 10 HORAS 7.15 KW.h

FIGURA 95 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 2°C CON LA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF

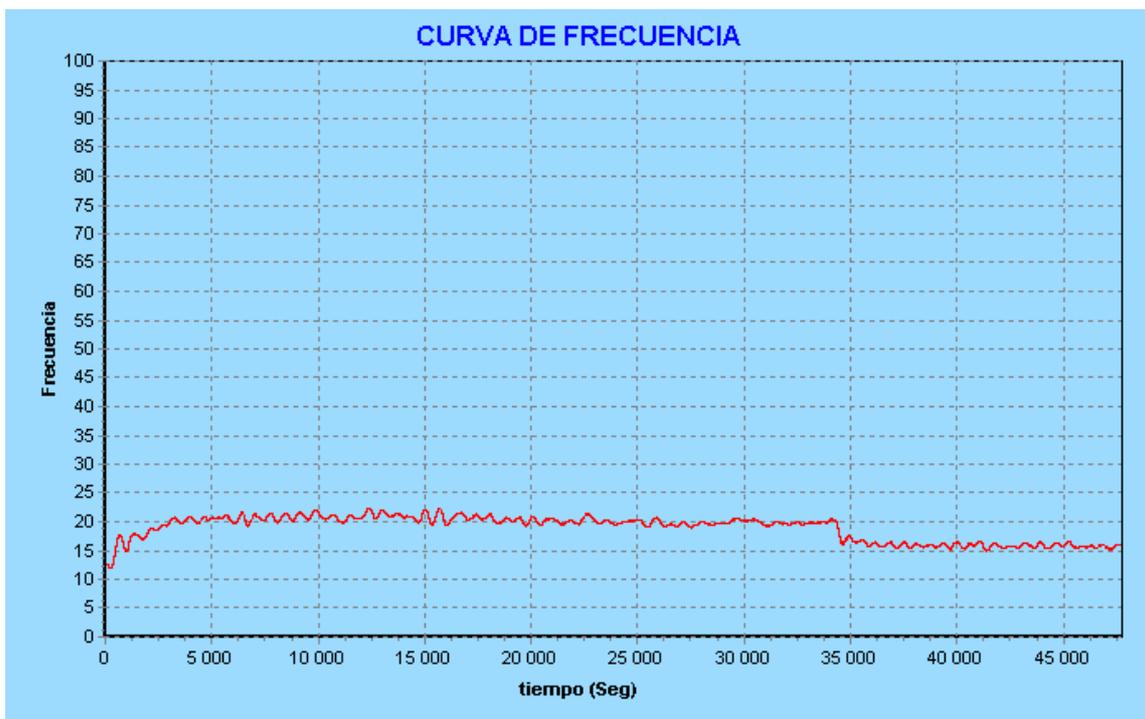


FIGURA 96 FRECUENCIA DE OPERACION CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE 0°C CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

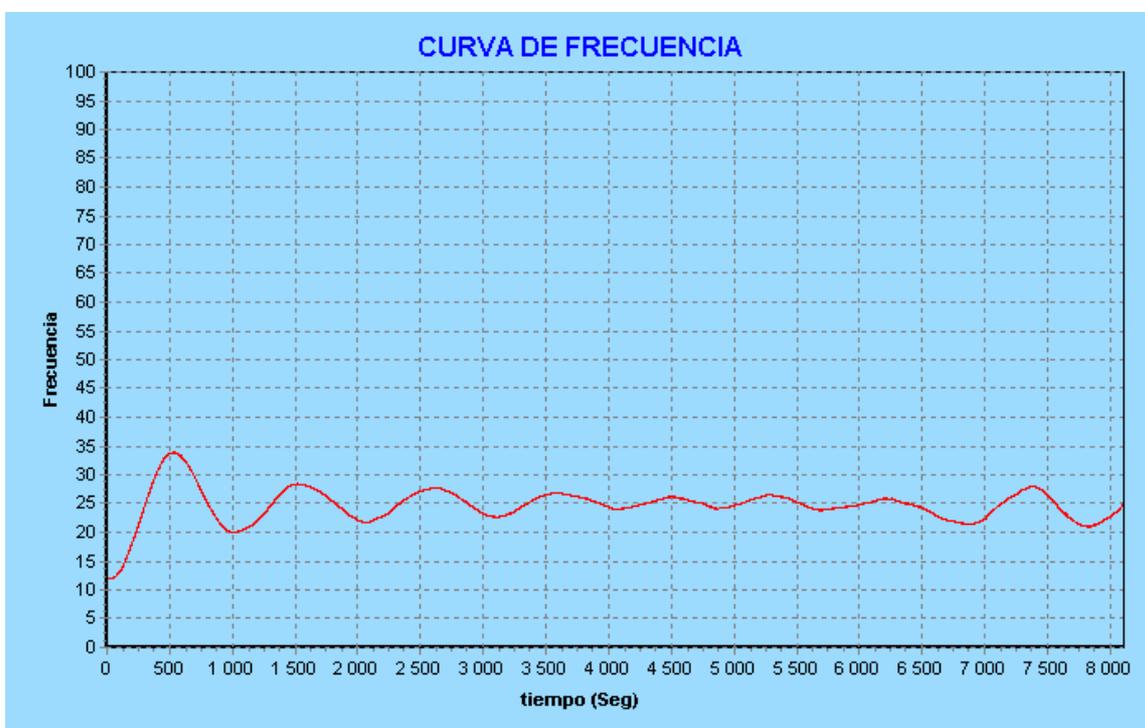


FIGURA 97 FRECUENCIA DE OPERACION CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -3°C CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

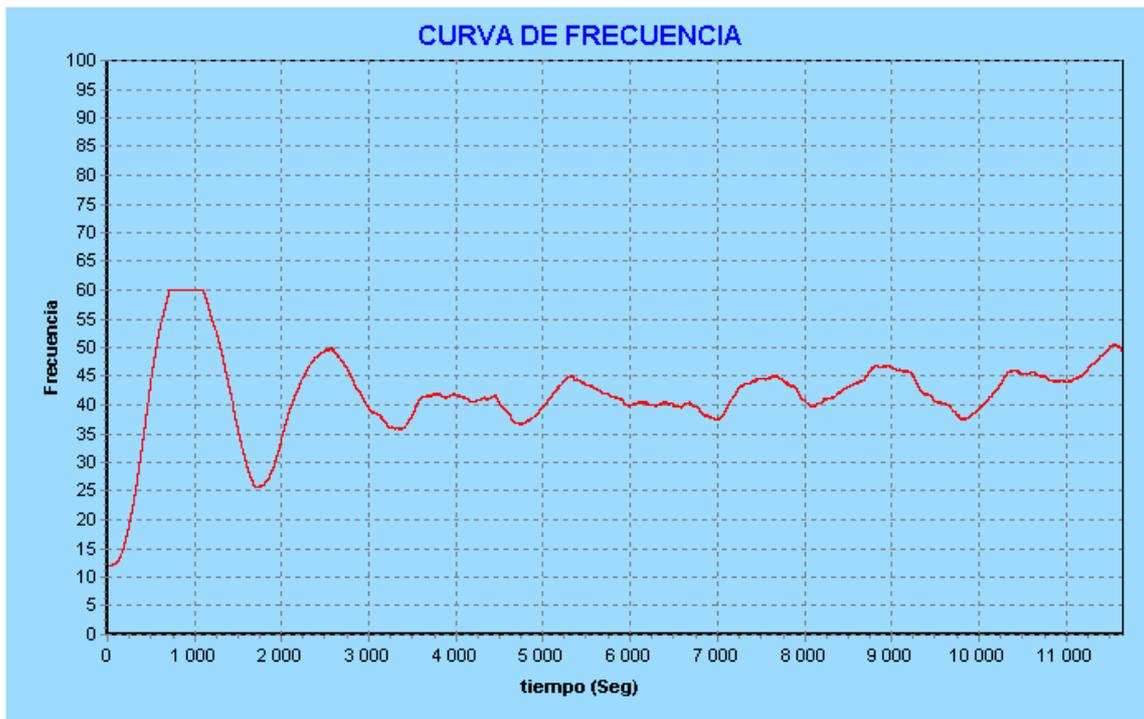


FIGURA 98 FRECUENCIA DE OPERACION CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

8.3.2 Aumento de la carga. El aumento en la carga motiva un mayor consumo de energía y este consumo variara dependiendo de la estrategia de control que se utilice.

- Con la estrategia de control on-off. la razón por la cual se genera un mayor consumo de energía al aumentar la carga esta considerado en la forma como la estrategia regula la capacidad del sistema prendiendo y apagando los equipos y esto a su vez con la transferencia de calor que ocurre mientras se prenden o apagan los mismos.

Para explicar el aumento en el consumo de energía remitirse a la ecuación 8.4 y observar que siendo el ΔT del producto refrigerado positivo al aumentarse la carga la expresión m_{PROD} aumenta y el tiempo que deberán permanecer encendidos los equipos será mayor que el tiempo con carga baja.

Al observar la ecuación 8.6 se observa que así como el tiempo que permanecen encendidos los equipos también aumenta, el tiempo que permanecen apagados los equipos igualmente se aumenta.

Aparentemente así como el sistema de refrigeración con una carga alta consume más energía al permanecer mas tiempo encendidos los equipos que el mismo sistema con carga baja, así mismo ahorra energía al permanecer mas tiempo apagados los equipos. Pero si consideramos la relación RPA apagado-prendido para cada caso tendremos un criterio para demostrar porque hay un mayor consumo de energía con una mayor carga.

$$RPA = \frac{\text{tiempoapagado}}{\text{tiempoencendido}} \quad (8.9)$$

Si la relación RPA aumenta significa que el sistema permanecerá la constante RPA veces apagado lo que el mismo permanezca encendido, lo cual en el tiempo se traduce en un ahorro de energía.

En la tabla 11 se muestran los tiempos que duran apagados o encendidos los equipos para la condición de carga alta y carga baja para cada una de las temperaturas de referencia correspondientes en un sistema sin perturbaciones al ambiente interior con una diferencia de 2°C y sus correspondientes valores RPA.

Tabla 11 Tiempo de encendido y apagado de los equipos en segundos y el Valor RPA

		Temperatura de referencia				
		10	5	0	-3	-6
CARGA ALTA	ON	178	234	300	500	2250
	OFF	3750	2187	1450	1250	1150
	RPA	21	9	4.8	2.5	0.51
CARGA BAJA	ON	125	214	220	250	450
	OFF	3000	2142	1200	1090	750
	RPA	24	10	5.5	4.8	1.66

El valor RPA también es función de la temperatura de referencia, lo que lo relaciona con el aumento en el consumo de energía debido a esta condición, pero en este caso no es un factor muy significativo (ver figura 99).

El análisis anterior explica la razón por la cual se consume una mayor cantidad de energía con la condición de carga alta que con la carga baja, pero no explica el porque de la disminución del RPA o la relación del tiempo apagado-encendido.

La reducción del RPA tiene que ver con la disminución relativa del tiempo que duran apagados los equipos con el aumento de la carga, ya que el tiempo en que están apagados los equipos se incrementa, así mismo la cantidad de calor que provino del medio ambiente exterior; al observar la ecuación 8.6, si el calor que entra por las paredes se aumenta el tiempo de descanso disminuye. Igualmente sucede cuando los equipos están encendidos, al aumentarse el tiempo en que están encendidos los equipos entrara una mayor cantidad de calor que la que entraría si el tiempo fuera menor, luego al observar la ecuación 8.4 el tiempo debe aumentar.

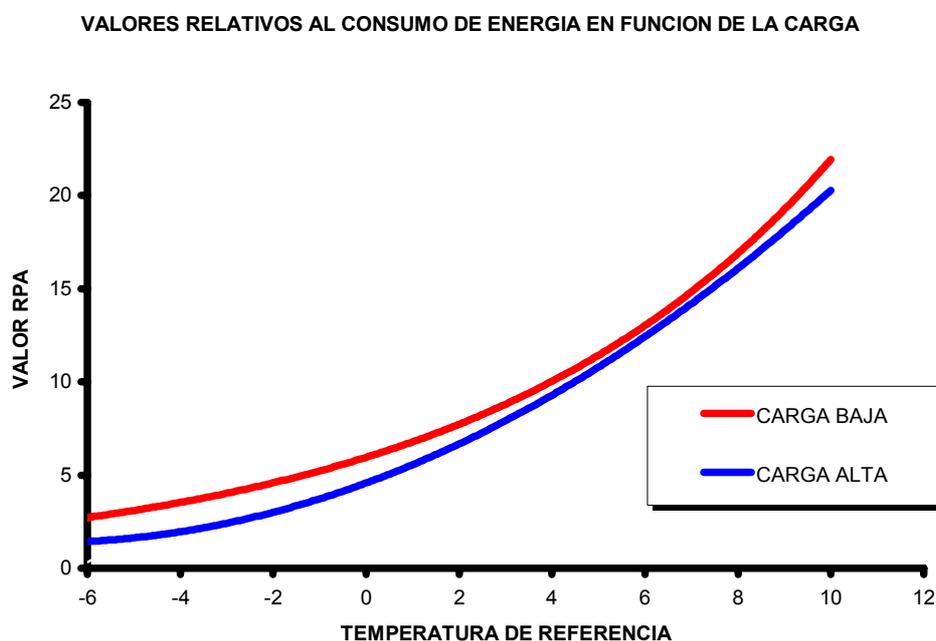
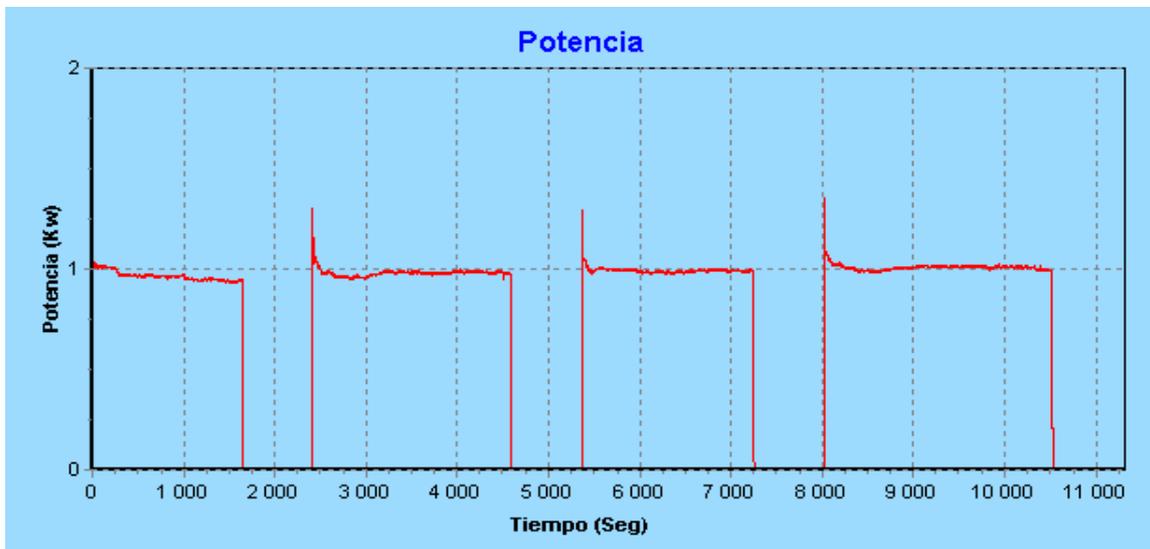


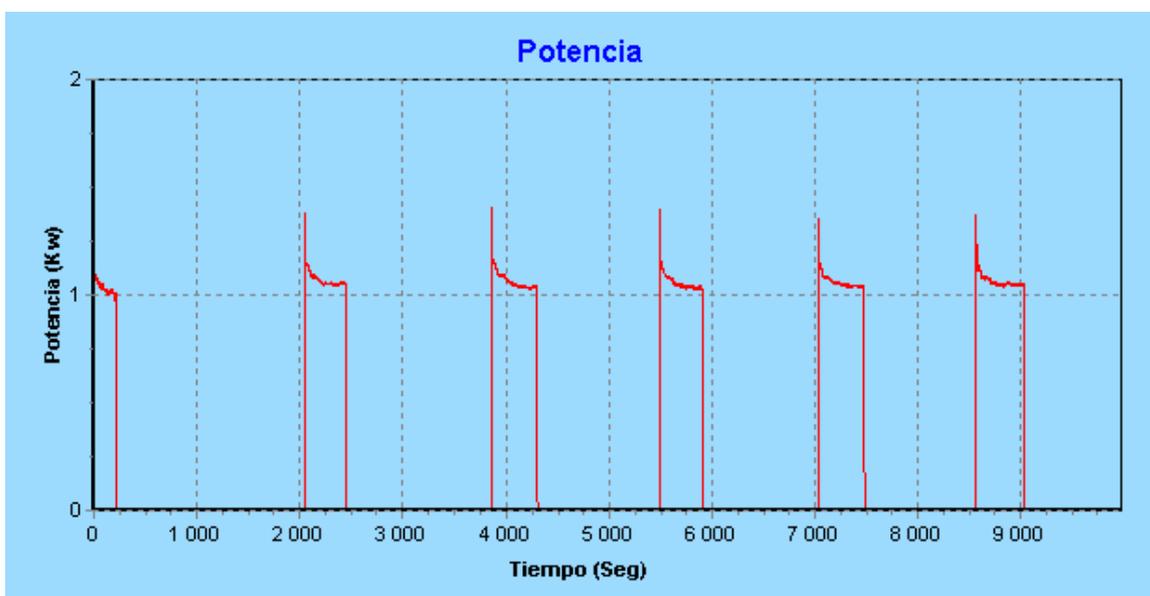
FIGURA 99 VALORES RPA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE REFERENCIA PARA LAS DOS CONDICIONES DE CARGA PARA UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF CON UNA DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 2°C

El consumo de energía para la estrategia de control on-off variando la carga con una diferencia de temperatura de 2°C se muestra en las figuras 100 y 101.



CONSUMO DE ENERGIA EN 10 HORAS 7.15 KW.h

FIGURA 100 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 2°C CON LA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF



CONSUMO DE ENERGIA EN 10 HORAS 2.93 KW.h

FIGURA 101 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA BAJA SIN PERTURBACIONES
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -6°C Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE 2°C CON LA ESTRATEGIA DE
CONTROL ON-OFF

- Con la estrategia de control continuo.
 - Antes del equilibrio térmico. Al iniciarse la conservación el consumo de energía dependerá de la temperatura con la que ingrese el producto al ambiente interior del cuarto, si la temperatura con la que ingresa es mayor que la temperatura de referencia y se tiene una carga alta, el calor que tiene que sacar el sistema de refrigeración es mayor y el sistema de control responderá aumentando la frecuencia de operación del equipo, si la carga es baja el calor a sacar es menor y la frecuencia de operación será menor. En la figura 89 se muestra que la línea de tendencia del consumo de energía con carga alta ira descendiendo proporcionalmente en la medida que se va alcanzando el equilibrio hasta que se iguala con la línea de tendencia del consumo con carga baja.
 - Después del equilibrio térmico. Cuando se alcanza el equilibrio entre las temperaturas del producto y el ambiente interior no habrá diferencia en el consumo de energía para una condición de carga alta o carga baja pues el único calor que saca el sistema es el que ingresa por las paredes del cuarto de conservación.

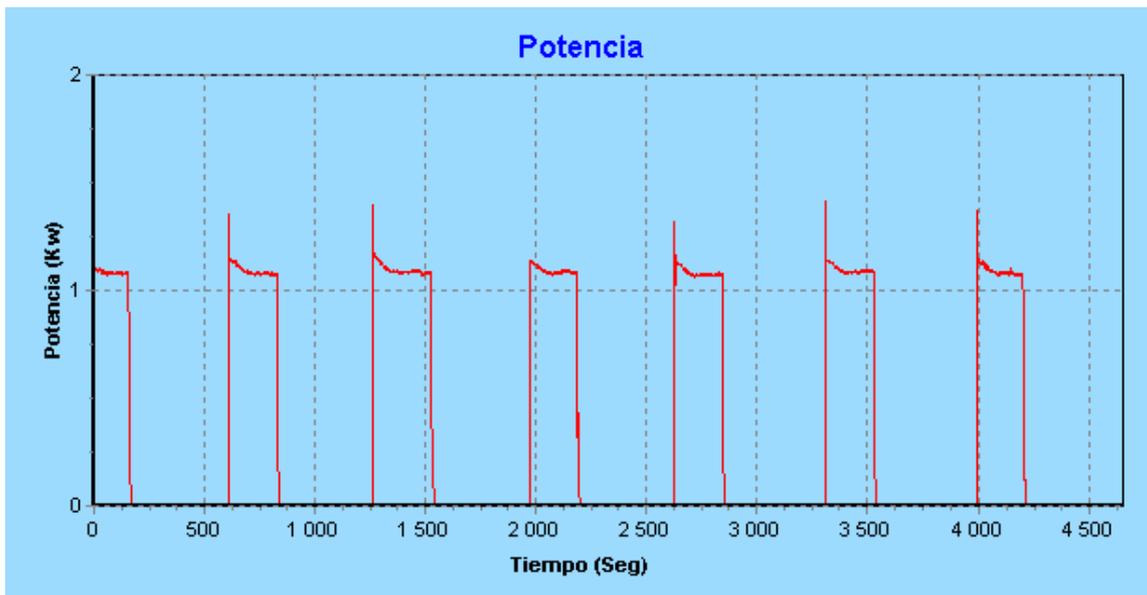
8.3.3 Aumento de las perturbaciones sobre el ambiente interior. La aparición de perturbaciones sobre el ambiente interior aumenta el calor que el sistema tiene que sacar del medio para mantener la temperatura del producto, debido a que aparece una fuente intermitente de calor producto de la abertura de puertas y del ingreso de personas al ambiente refrigerado. La manera como responde cada estrategia a las perturbaciones es diferente y como tal el consumo de energía, por lo tanto serán tratadas por separado.

- Estrategia de control on-off. Para poder sacar esa cantidad de calor adicional los equipos deberán estar prendidos un mayor tiempo y en el caso de estar

apagados el tiempo de descanso será menor (observar ecuaciones 8.4 y 8.6). Como lo demuestran las ecuaciones anteriores el componente adicional hace que el consumo de energía se incremente.

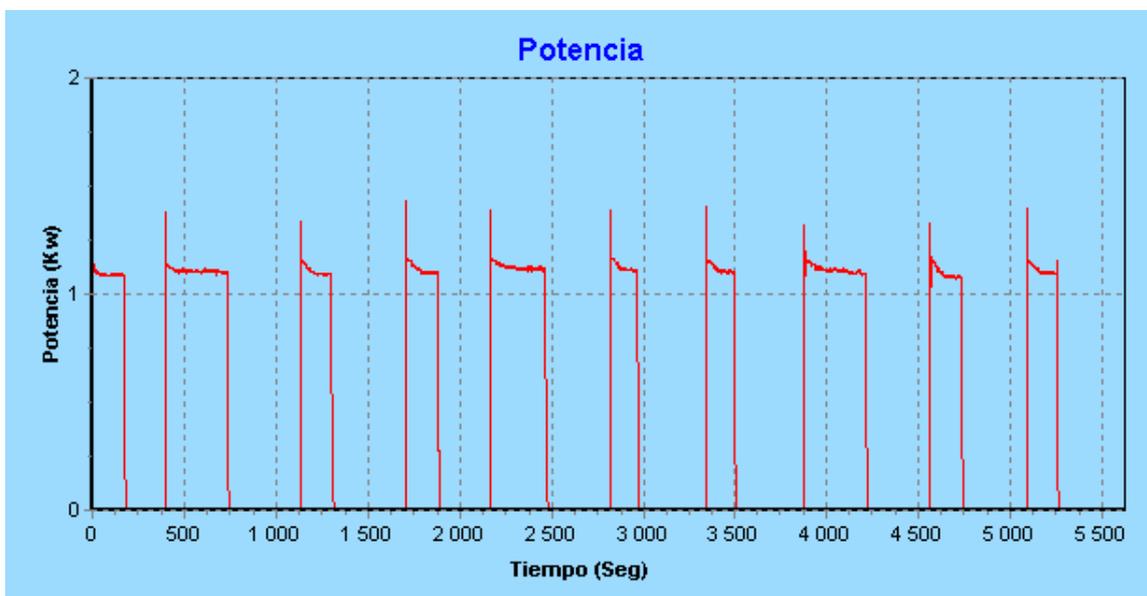
Las figuras 102 y 103 muestran el comportamiento del consumo de energía con la estrategia de control on-off cuando el sistema es sometido a posibles perturbaciones con una diferencia de temperatura de 1°C .

- Estrategia de control continuo. Esta estrategia responde a las perturbaciones aumentando la frecuencia de operación del equipo automáticamente con el inicio de la perturbación para sacar inmediatamente el calor adicional y reestablecer el equilibrio térmico nuevamente. Las perturbaciones alteran el equilibrio térmico inmediatamente se presentan y se genera una oscilación de la frecuencia de operación del equipo alrededor de la frecuencia correspondiente a la carga térmica cuando el sistema estaba en equilibrio, la amplitud y el tiempo de la oscilación dependerá de las constantes establecidas en el control PID, de la intermitencia de la perturbación y del tiempo que duren las mismas, la figura 104 ilustra este comportamiento.



EL CONSUMO DE ENERGIA EN 10 HORAS FUE 3.74 KW.h

FIGURA 102 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA SIN PERTURBACIONES PARA UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -3°C CON UNA DIFERENCIA DE 1°C CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF



EL CONSUMO DE ENERGIA EN 10 HORAS FUE 4.24 KW.h

FIGURA 103 CONSUMO DE ENERGIA CON UNA CONDICION DE CARGA ALTA CON PERTURBACIONES PARA UNA TEMPERATURA DE REFERENCIA DE -3°C CON UNA DIFERENCIA DE 1°C CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

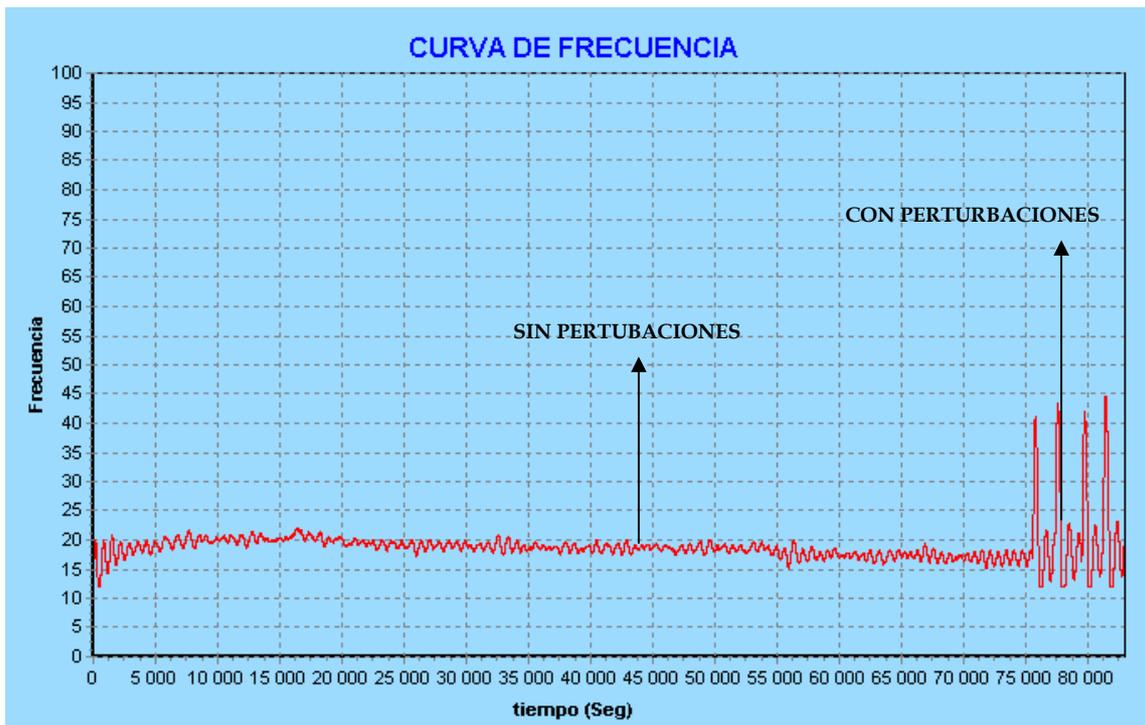


FIGURA 104 FRECUENCIA DE OPERACION CON UNA CONDICION DE CARGA BAJA, TEMPERATURA DE REFERENCIA -3°C PRODUCTO DE LA APARICION DE PERTURBACIONES AL AMBIENTE INTERIOR CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

8.4 RAZONES POR LAS CUALES SE CONSUME MÁS ENERGÍA CON LA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

Las causas por las cuales se presenta un mayor consumo de energía con la estrategia de control on-off podemos definir las como:

- Perdidas asociadas a la ineficiencia del proceso de refrigeración, las cuales fueron analizadas en el capítulo anterior (hechos relativos al comportamiento de los sistemas), cuando se llevo a cabo el proceso de refrigeración para el ejemplo dado en ese capítulo con la estrategia de control continuo la eficiencia total del sistema (multiplicación de la eficiencia del motor eléctrico con la eficiencia mecánica del compresor) fue

del 46.4% mientras que la eficiencia con la estrategia de control on-off fue del 41%. Lo cual quiere decir que debido a la eficiencia total del sistema la estrategia de control on-off consumió un 13.2% mas de energía de lo que hubiera sido necesario si tuviera la misma eficiencia que la estrategia de control continuo.

La eficiencia volumétrica es el factor mas influyente en el aumento del consumo de energía debido a las ineficiencias del proceso de refrigeración pues es la responsable de que con la estrategia de control on-off el equipo hubiera permanecido encendido un 18% mas de lo que hubiera sido necesario si tuviera la misma eficiencia volumétrica del control continuo. La eficiencia volumétrica de la estrategia de control on-off en el ejemplo anterior es del 55% mientras que para la estrategia de control continuo es del 65%, si a este tiempo adicional le agregamos la eficiencia total del sistema el valor total de las pérdidas de energía ineficiencia se incrementarían.

La energía consumida en exceso debido a las ineficiencias del sistema de refrigeración con la estrategia de control on-off es del 33% (para el ejemplo dado) con respecto a la energía necesaria con la estrategia de control continuo.

- Perdidas debidas a la transitoriedad del sistema durante los periodos de arranque-parada. La dinámica del refrigerante durante el arranque del sistema es la responsable por la demora de este en alcanzar el régimen permanente degradando la eficiencia del sistema. Otra fuente de pérdida asociada a la desconexión del sistema es debida a la migración del refrigerante del condensador hacia el evaporador. Inmediatamente después que el sistema se apaga la mayor parte del refrigerante se encuentra en el condensador o en la línea de líquido, a una presión elevada, con el transcurso del tiempo el refrigerante buscará un estado de equilibrio

mecánico migrando hacia el evaporador de manera que se igualen las presiones y las temperaturas del sistema.

Para cuantificar las pérdidas debidas al periodo transitorio del sistema, Krause y Bullard (1996), compararon el funcionamiento de un Refrigerador-Freezer operado por un control On-Off, con un sistema hipotético cuasi-estático. Los autores identificaron una degradación de 3 al 5% en la eficiencia del ciclo, debido al aumento del consumo de la energía eléctrica y a las pérdidas en la capacidad de refrigeración.

9. COSTOS Y FORMAS DE IMPLEMENTAR UNA ESTRATEGIA DE CONTROL TANTO ON-OFF COMO CONTINUÓ

9.1 IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ON-OFF

La implementación de esta estrategia se puede llevar a cabo por medio de dos tipos principales de controles para regular el ciclo de operación y descanso de un sistema de refrigeración.

- Controles de acción por temperatura (Termostatos)
- Controles de acción por presión (Presostatos)

9.1.1 Controles de acción por temperatura



FIGURA 105 TERMOSTATO

Los termostatos son los encargados de controlar el nivel de temperatura de un espacio refrigerado operando sobre el ciclo de trabajo del compresor por medio de la abertura o cierre de los contactos eléctricos que energizan el compresor (dependiendo del termostato pueden ser de acción directa o indirecta, de acción

directa funcionan como un relé y pueden soportar hasta 10 Amp y de acción indirecta abren o cierran los contactos que energizan un relé preactuador). Cuando la temperatura del ambiente refrigerado se encuentra por encima de la temperatura de referencia menos la diferencia de temperatura el termostato mantiene los contactos cerrados y el compresor estará energizado, cuando esta temperatura se hace menor, el termostato abre los contactos y espera hasta que la temperatura sea mayor que la temperatura de referencia mas la diferencia de temperatura establecida para reestablecer la conexión.

Los termostatos como el de la figura 105 pueden controlar la temperatura entre -20 y 600 °C y el usuario puede establecer la diferencia de temperatura del equipo a través del display, algunos termostatos poseen función de retardo a la conexión temporizada y programación de tiempos mínimos de conexión y desconexión.

En la implementación de la estrategia de control on-off es recomendable que se apague el evaporador cuando el compresor esta apagado, porque el refrigerante que se encuentra a una presión elevada tratara de buscar el equilibrio mecánico y causara la elevación de la temperatura del refrigerante dentro del evaporador al igualarse las presiones de alta y baja, y si el evaporador sigue encendido estará calentando el ambiente interior y el tiempo de descanso de los equipos será menor, lo cual produciría un mayor consumo de energía, además del ahorro que se presentaría al apagar tanto el evaporador como el condensador.

En la figura 106 se muestra la manera como se implementa una estrategia de control on-off accionada por termostato.

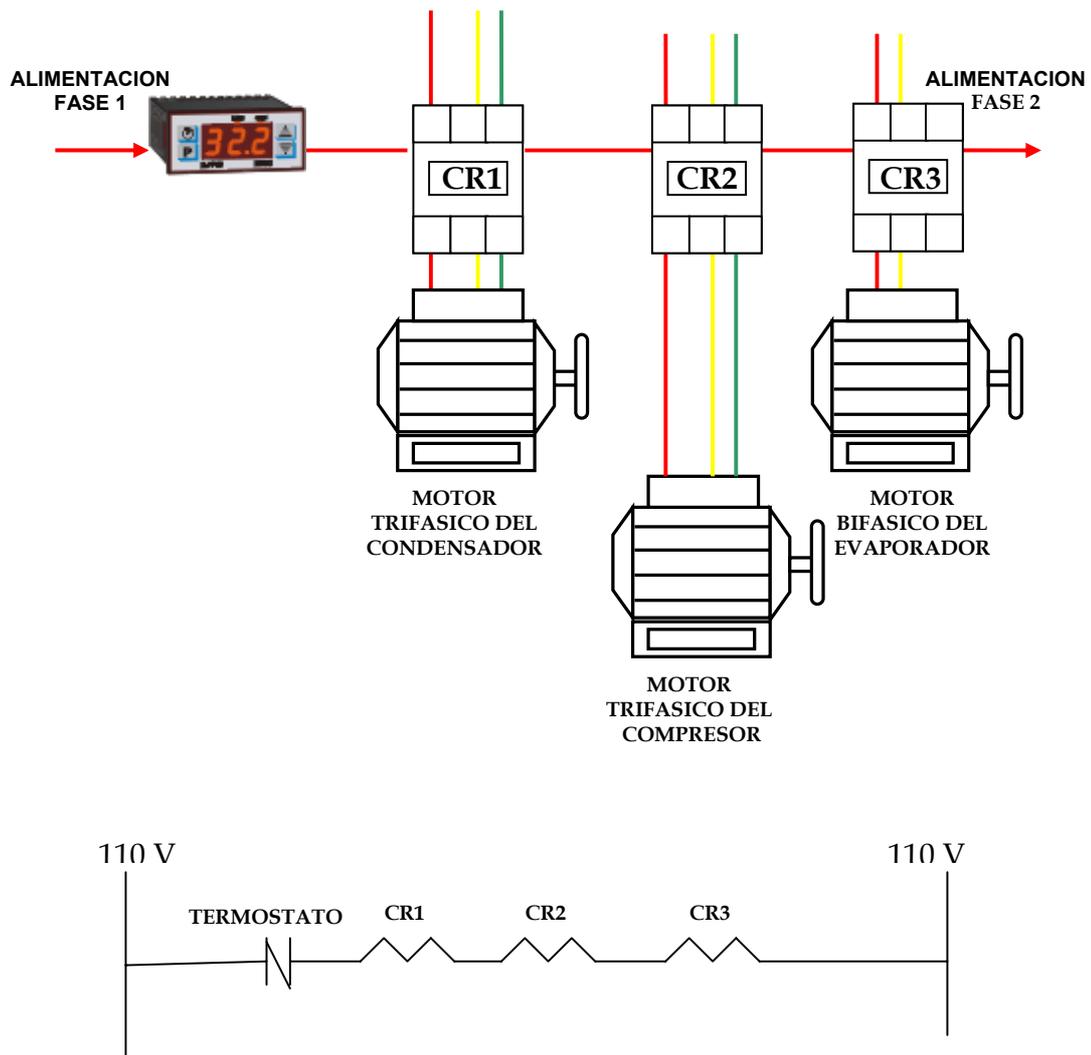


FIGURA 106 IMPLEMENTACION DE UN CONTROL ON-OFF POR TERMOSTATO DE ACCION INDIRECTA DESCONECTANDO TODOS LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

Esta instalación es relativamente económica, el valor del termostato oscila entre (70000 - \$150000) dependiendo de las funciones que realice, y el relé dependiendo de su intensidad puede costar entre (150000 - \$500000).

Así la instalación anterior puede costar entre (520000 - \$1570000).

9.1.2 Controles de acción de presión.



FIGURA 107 PRESOSTATO

Los controles de acción por presión, son de dos tipos: de acción a baja presión (conectan al lado de baja presión del sistema) y acción a alta presión (conectan en la descarga del compresor). Los controles a baja presión son los que se emplean en la estrategia de control on-off para regular indirectamente la temperatura del ambiente interior del cuarto de conservación, los controles de alta presión se emplean por seguridad, solo desconectan el compresor en caso de que la presión del lado de alta del sistema sea excesiva.

Puesto que la presión en la entrada de succión del compresor está controlada por la temperatura de saturación del refrigerante en el evaporador. Los cambios en la temperatura del evaporador se reflejan en cambios en la temperatura de succión. Por lo tanto, un control operado por cambios en la presión de succión se puede usar para controlar indirectamente la temperatura del ambiente interior del cuarto, controlando la temperatura del evaporador.

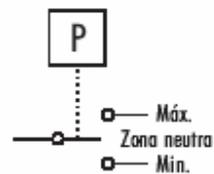
El presostato de baja presión actúa abriendo el circuito de control de los equipos cuando la presión en el lado de baja se reduce producto de un descenso en la temperatura del evaporador y cierra el circuito cuando la presión de baja ha aumentado como resultado de la diferencia de temperatura establecida.

La presión de desconexión se establece por medio del apriete de un tornillo en el costado del presostato, así mismo se establece la diferencia de temperatura para que prendan los equipos nuevamente, solo que en este caso se regula con una diferencia de presiones.

Los Presostatos pueden controlar la temperatura del ambiente interior indirectamente entre -50 y 150°C ó una presión desde $0 - 0,3\text{Bar}$ a $10 - 30\text{Bar}$.

A continuación se presentan los Presostatos más comunes en el mercado.

A.



B.

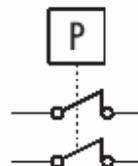


FIGURA 108 A Y B PRESOSTATOS MECANICOS Y SU CONEXIONADO

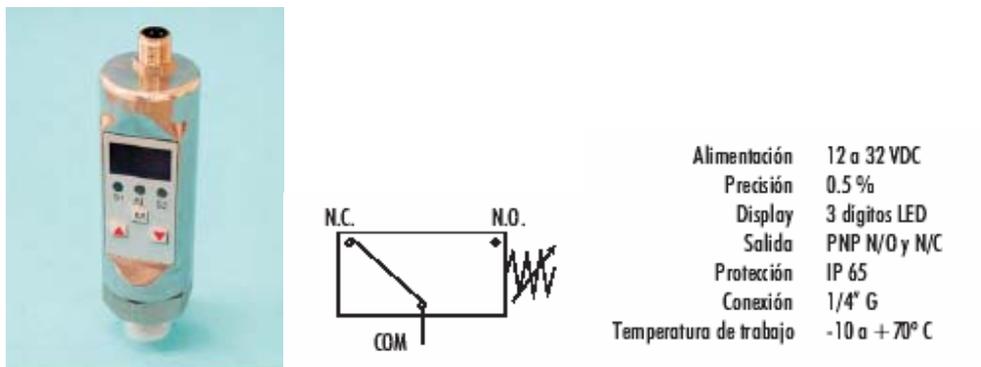


FIGURA 109 PRESOSTATO ELECTRONICO

La forma como se implementa la acción de control utilizando el presostato es igual a la que se plantea para el termostato, a continuación se presenta el circuito de control utilizando el presostato.

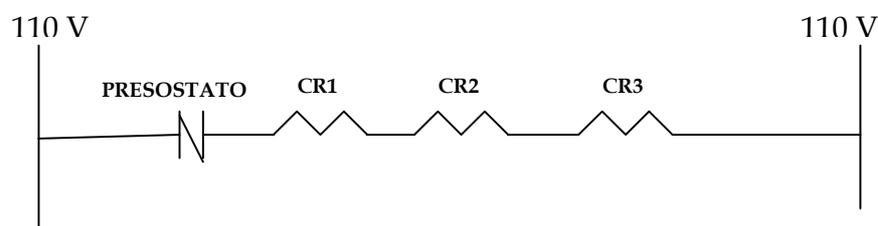


FIGURA 110 IMPLEMENTACION DE UN CONTROL ON-OFF POR PRESOSTATO DESCONECTANDO TODOS LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

El costo de la instalación de control a través de un presostato como el medio que conecta y desconecta los equipos es también económica, el costo de los relees es igual al caso anterior, el presostato cuesta \$70000 si es de tipo mecánico y si es de tipo electrónico \$450000.

Luego la instalación puede costar entre (520000 - \$1970000).

9.2 IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO

La implementación de la estrategia de control continuo se hace teniendo en cuenta que:

- El principal componente de la estrategia de control continuo es el variador de velocidad
- El variador de velocidad esta gobernado por un sistema de control que puede ser basado en PC, un autómatas programable ó un microcontrolador.

9.2.1 Sistema de control basado en PC. Un sistema de control basado en PC necesita para su ejecución un mecanismo (hardware) que le permita intercambiar datos entre el proceso y el computador, ese mecanismo puede ser:

- Un sistema Fieldpoint. Este es un sistema distribuido modular de E/S analógicas y digitales que se conecta con el computador a través del puerto serial RS-232.



FIGURA 111 SISTEMA FIELDPOINT

- Tarjetas de adquisición de datos. Cumplen la misma función que el Fieldpoint pero dejan de ser un sistema distribuido modular y se convierten en tarjetas especiales para cada tipo de señal en particular.

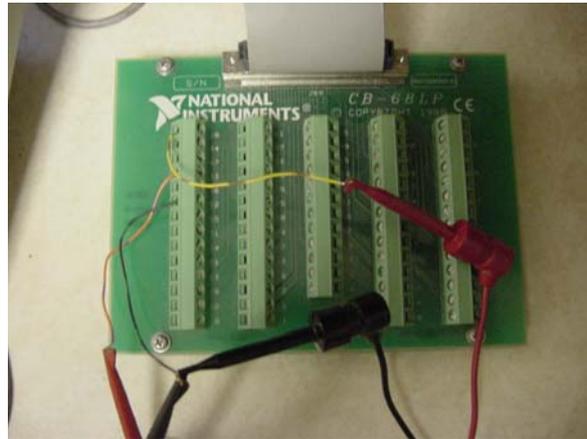


FIGURA 112 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS

A su vez para intercambiar datos se necesita de un componente software que realice las operaciones programables de los procesos de transferencia de información, fabricantes como National Instrument suministran el software (Labview), o este puede ser realizado por el usuario en lenguajes estándar como DELPHI.

La figura 113 muestra la implementación de la estrategia de control continuo basado en el PC como mecanismo de control.

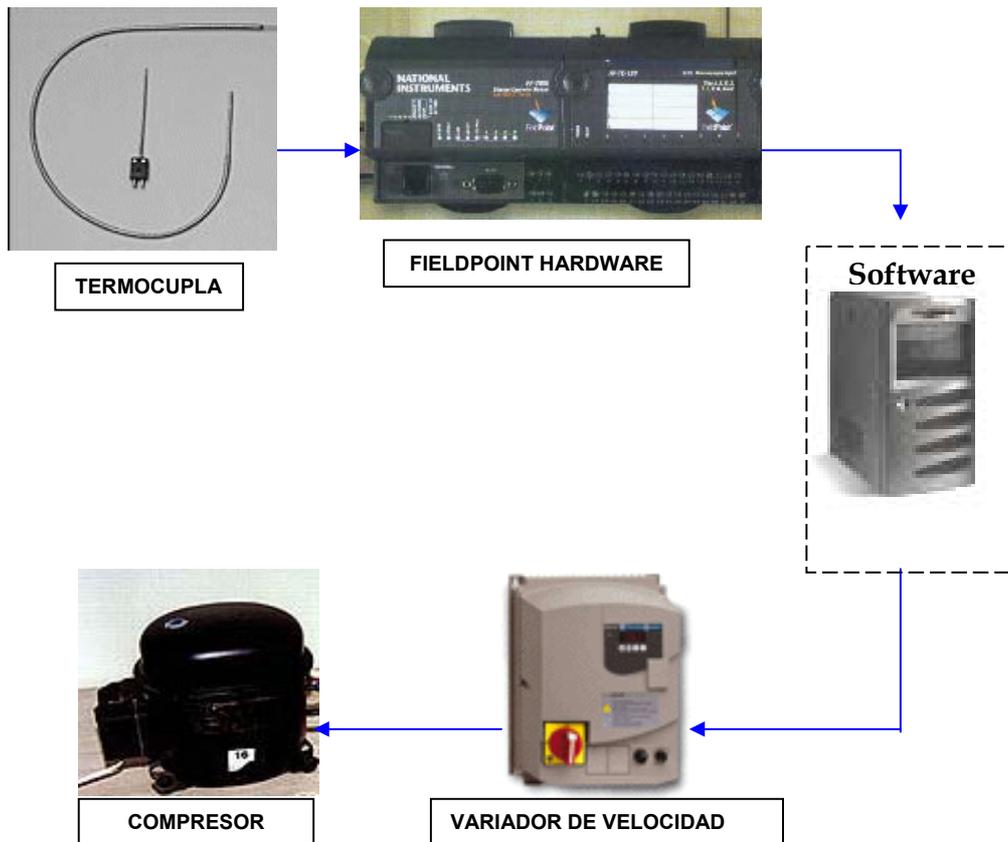


FIGURA 113 IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO A TRAVES DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN PC UTILIZANDO EL SISTEMA FIELDPOINT

9.2.2 Sistema de control basado en un autómata programable. Un autómata programable es un dispositivo de control (hardware) que se adapta a un proceso mediante un programa específico (software) que contiene la secuencia de las operaciones a realizar. Esta secuencia de operaciones se define sobre las señales de entrada y salida al proceso, cableadas directamente en los bornes de conexión del autómata.



FIGURA 114 AUTOMATA PROGRAMABLE

La implementación de la estrategia de control continuo basados en un autómata programable como sistema de control elimina dos componentes con relación al sistema basado en PC, la figura 115 ilustra este hecho.

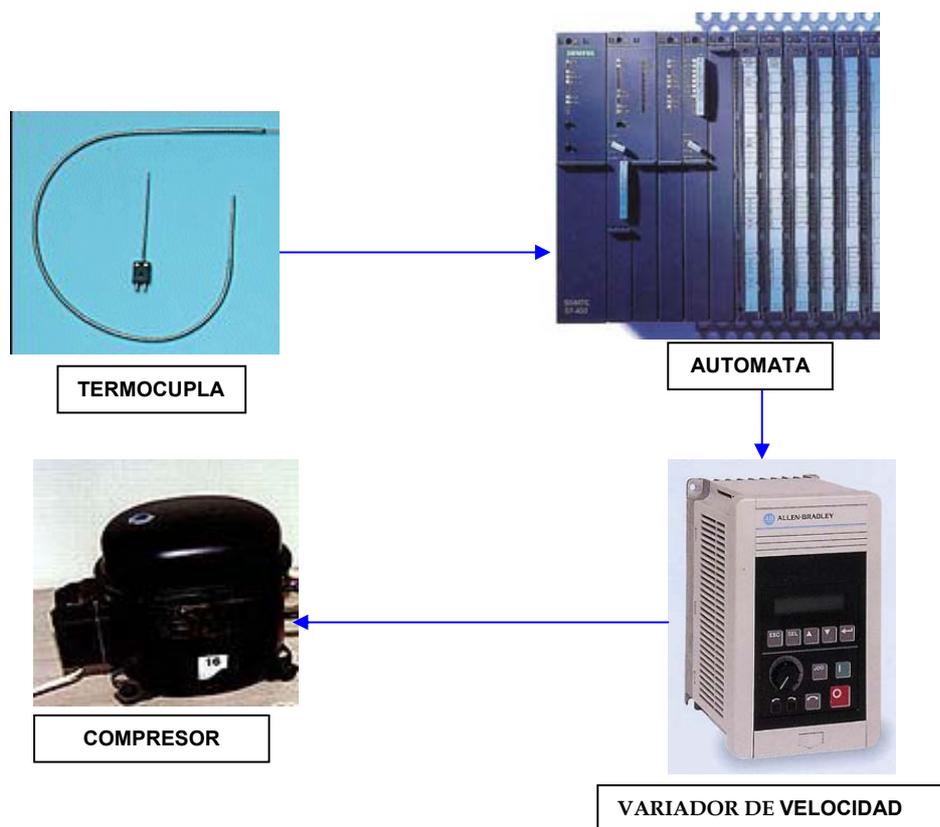


FIGURA 115 IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO A TRAVES DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN UN AUTOMATA

9.2.3 Sistema de control basado en un microcontrolador.



FIGURA 116 TARJETA DE CONTROL

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico capaz de llevar a cabo procesos lógicos que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador CPU, memoria y unidades de E/S, es decir, se trata de un computador monopastilla, aunque de limitadas prestaciones y que normalmente se dedica a resolver una tarea específica.

La implementación del sistema de control basado en microcontroladores se parece al planteado con el autómata, la figura 117 aclara la construcción de la estrategia de control continuo con el uso de microcontroladores.

9.2.4 Costos de la implementación de una estrategia de control continuo

(Ver tabla 12)

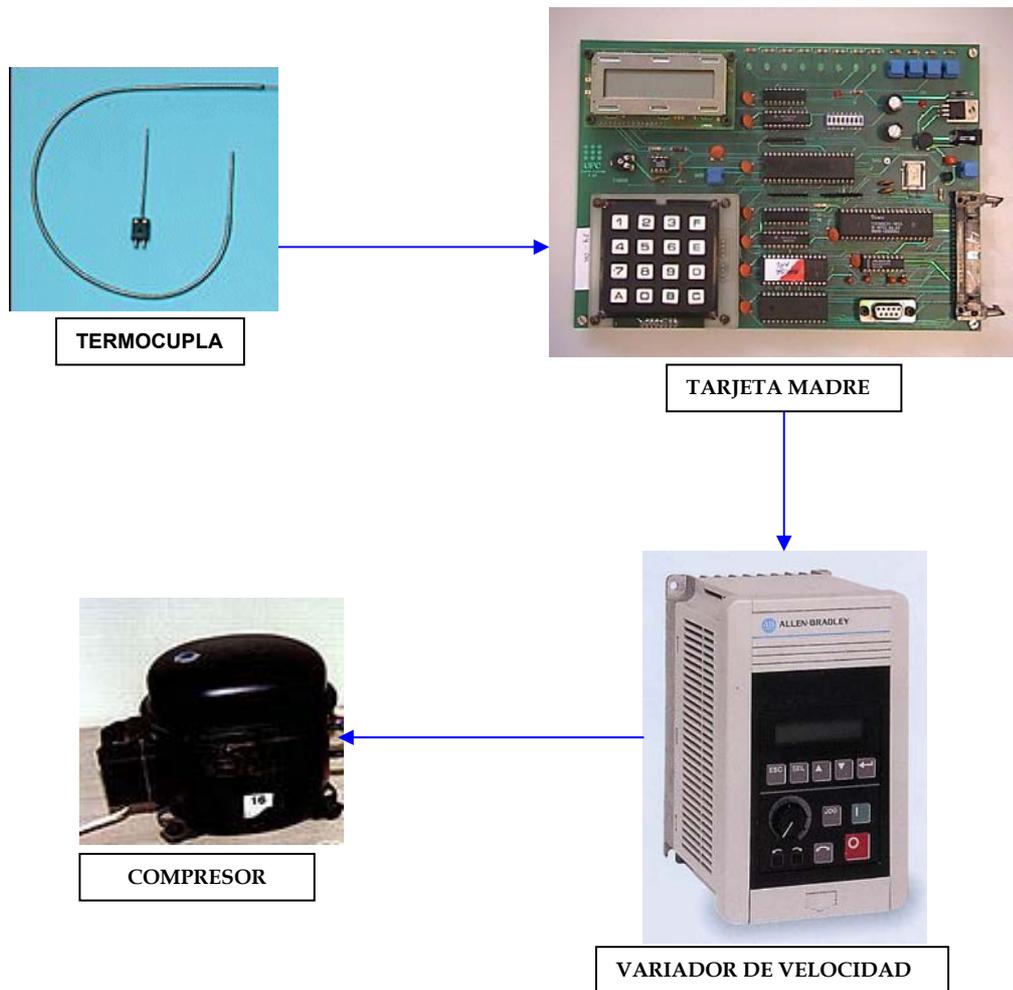


FIGURA 117 IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO A TRAVES DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN UN MICROCONTROLADOR

Tabla 12. La tabla 12 muestra el valor que puede tener en el mercado cada uno de los distintos componentes necesarios para realizar la estrategia de control continuo.

COSTOS DE LA IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL CONTINUO EN PESOS

	CONTROL BASADO EN PC	CONTROL BASADO EN AUTOMATAS	CONTROL BASADO EN MICROCONTROLADORES
VARIADOR DE VELOCIDAD	(600.000-1'000000)	(600.000-1'000000)	(600.000-1'000000)
TERMOCUPLA	100000	100000	100000
FIELDPOINT MODULO DE RED FP-1000	1'218.000		
MODULO DE TERMOCUPLAS	1'078.000		
BASE PARA MODULO FP-TC	546.000		
MODULOS SALIDAS ANALOGICAS FP-AO-200	1'218.000		
BASE PARA FP-AO-200	546.000		
SOFTWARE LABVIEW 7.0	(3'066.000-6'146.000)		
AUTOMATA S7-200 CPU 222		1'057.000	
MODULO 2 SAL ANALOGICAS		908.700	
MODULO 4 ENTRADAS PARA TERMOCUPLAS		1'133.500	
CABLE PARA LA INTERFASE		425.600	
TARJETA MADRE CON MICROCONTROLADOR			300.000
COSTO TOTAL	\$8'372.200	\$4'224.800	\$1'000.000

10 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

10.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo que se ha llevado a cabo en este proyecto de grado. Se señalan los aportes del mismo, destacándose la preponderancia de la estrategia de control continuo sobre la estrategia de control on-off en donde sea posible su aplicación. Además se incluyen sugerencias para la implementación de cada estrategia de control.

10.2 CONCLUSIONES

- Con la implementación de la estrategia de control continuo se garantiza la permanencia de la temperatura del producto (cuando ya se haya alcanzado el equilibrio térmico) a la temperatura de referencia establecida sin importar los posibles cambios que pueda tener la carga térmica sobre el sistema debido a la continua variación de la temperatura ambiental exterior o a las perturbaciones a las que pueda tener lugar el ambiente interior del cuarto de conservación.
- Regulando la capacidad del sistema de refrigeración con la estrategia de control continuo se presenta un notable ahorro de energía a cualquier condición a la que se este llevando a cabo el proceso de refrigeración con respecto a la regulación con la estrategia de control on-off.

- Cuando se necesita conservar una cantidad de producto dada por periodos de inactividad prolongados la mejor estrategia de control es la continua ya que garantiza operar el sistema más eficientemente y un ahorro de energía muy considerable.
- Entre mas sobredimensionado haya sido la selección del compresor mayor energía se ahorrara al operar el sistema con una estrategia de control continuo y a su vez mayor será la garantía de vida del equipo debido a que si se hubiera implementado una estrategia de control on-off los periodos de arranque parada hubiesen sido demasiados excesivos.
- Bajo una condición de carga alta a temperatura de referencia baja es preponderante el uso de la estrategia de control continuo con respecto a la on-off, ya que con la estrategia de control on-off con una condición de carga alta la temperatura del ambiente interior desciende muy por debajo de la temperatura de referencia y permanece así un tiempo mayor que si hubiera tenido una condición de carga baja, luego se mejora la transferencia de calor del ambiente exterior al ambiente interior y el calor que entra al sistema es mayor y eso representa un mayor gasto de energía.
- Cuando el sistema es sometido a perturbaciones periódicas en su ambiente interior el ahorro de energía que se presenta con la estrategia de control continuo disminuye proporcionalmente con el aumento del tiempo que duren las perturbaciones y la regularidad con la que se den las mismas con respecto a la estrategia de control on-off.
- Con el uso del variador de velocidad en la estrategia de control continuo se presenta un desplazamiento en el cero de la onda de corriente originado por las componentes armónicas que genera la instalación de ese equipo, esto

causa un aumento en el valor de la corriente (rms) cuyo efecto es el sobrecalentamiento del motor del compresor y pérdidas adicionales en los cables de conducción, sin embargo este efecto no es tan pronunciado ya que el desplazamiento es pequeño (corrientes armónicas bajas) y la temperatura del motor se mantiene en condiciones normales de trabajo.

- Al utilizar un componente electrónico adicional en la estrategia de control continuo se presenta un consumo extra de energía que se gasta manteniendo encendido el variador de velocidad, la energía adicional es muy pequeña del orden de 0.03 Kw.h, luego es prácticamente despreciable.
- Cuando se disminuyen las revoluciones del compresor se producen menores relaciones de compresión, al operar un sistema de refrigeración a baja velocidad y relaciones de compresión pequeñas se presenta un aumento en la eficiencia volumétrica del sistema lo cual influye reduciendo notoriamente el consumo de energía, situación que sucede con la estrategia de control continuo.
- La estrategia de control continuo opera el motor del compresor en su punto nominal, la estrategia de control on-off opera el motor del compresor a un 50% de la potencia nominal aproximadamente, lo cual hace que la eficiencia del motor eléctrico operado con la estrategia de control continuo sea mayor y se presente un ahorro de energía.

10.3 RECOMENDACIONES

- Cuando se utilice una estrategia de control continuo y se tenga una condición de carga baja es recomendable que el producto ingrese al cuarto de conservación a una temperatura cercana y menor que la temperatura de

referencia para garantizar que la temperatura del producto sea igual a la de referencia el mayor tiempo posible y se presente un menor consumo de energía.

- El campo de aplicación de la estrategia de control continuo esta limitado por la mínima frecuencia de operación permisible para el compresor (con el objeto de operar el compresor a un nivel de vibraciones seguro para la vida del equipo y de las instalaciones) lo cual reduce su utilización a temperaturas bajas, por lo general menores a 0°C.
- Al implementar la estrategia de control continuo se recomienda que la sintonización de las constantes del PID se haga con relación a la carga de conservación para prevenir la oscilación de la frecuencia de operación del equipo y de la temperatura ambiental interior antes de establecerse el equilibrio termico.
- Al implementar una estrategia de control continuo se recomienda utilizar un sistema de control basado en microcontroladores con el propósito de disminuir los costos de instalación de la estrategia.
- Cuando se implementa una estrategia de control on-off se recomienda aumentar la diferencia de temperaturas de apagado y encendido del compresor proporcionalmente con la reducción de la temperatura de referencia con el fin de disminuir la frecuencia de arranque del compresor.
- Cuando se emplea la estrategia de control on-off se recomienda apagar no solamente el compresor sino también los demás equipos; si el evaporador queda prendido y el compresor estuviera apagado, el evaporador estaría calentando el ambiente interior debido a que se presenta un aumento en las

temperatura del refrigerante en el interior del mismo ocasionado por la igualación de las presiones de succión y descarga, el condensador no estaría realizando ningún trabajo. Esto ocasionaría un mayor gasto de energía por parte del compresor (arranque y paradas más frecuentes) y un consumo de energía innecesario en los equipos restantes.

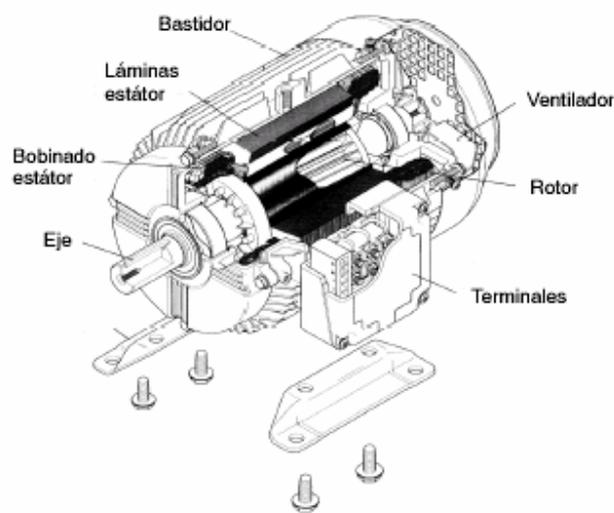
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Roy J. Dossat, Principios de refrigeración moderna.
- Guy R. King, Modern Refrigeration Practice. McGraw Hill, 1997
- J.B. Jones-R. E. Dugan, Ingeniería Termodinámica, Prentice-Hall Hispanoamericana, primera edición, 1997
- Johan Farith Petit-Armando Ustariz, Análisis general de armónicos revisión de las definiciones de potencia, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander 1997, E 7092
- L. C. Morrow, Manual de mantenimiento industrial, tomo 2, Editorial Continental, 1985
- Manual de Varitel Electrónica, www.varitel.com
- User Manual, FP-1000/1001, National Instrument Corporate Headquarters.
- Miller, W. A., 1998 Laboratory examination and seasonal analyses of the dynamic losses for a continuously variable-speed heat pump. ASHRAE Transactions. Vol. 94, Pt. 2.
- James, R. W. and Marshal, S. A., 1973. Dynamic analysis of a refrigeration system. Proc. Inst. Refrigeration, Vol. 70, p. 13-24.
- Garstang, S. W., 1990, Variable frequency speed control of refrigeration compressors -Part 2. Australian refrigeration, Air conditioning and heating.

- Control Digital, Acciones básicas de control y respuesta de sistemas de control.
2003
- J. P. Holman, Transferencia de calor, McGraw Hill, 1998

ANEXO A

PRINCIPIOS DEL CONTROL DE VELOCIDAD EN LOS MOTORES A INDUCCIÓN



CORTE TRANSVERSAL DE UN MOTOR ELECTRICO DE INDUCCIÓN

El motor a inducción jaula de ardilla es un motor de velocidad fijada, cuya velocidad es controlada por el número par de polos, y la frecuencia de alimentación a la que está conectado. Un pequeño cambio de velocidad se nota a medida que la carga en el motor cambia, como resultado del deslizamiento.

La ecuación para la velocidad del motor es:

$$N = \frac{f \times 120}{p} - s$$

N = Velocidad del motor en revoluciones por minuto

F = Frecuencia de alimentación del motor en Hz

P = Numero de polos en el estator

S = Deslizamiento del motor en revoluciones por minuto

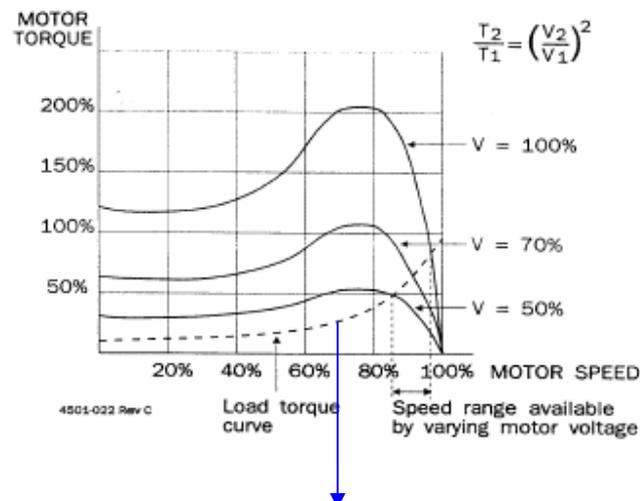
De está ecuación se desprende que la velocidad de un motor puede ser controlada de tres maneras:

a) Cambio en el número de polos.

Esto requiere un rotor con dos conjuntos de bobinados, y un conjunto de contactos de potencia para permitir la energización de cada bobinado.

b) Cambio en el valor de deslizamiento.

Esto se puede hacer mediante el ajuste de la tensión suministrada al motor (ver grafica siguiente). Causa que la curva torque vs velocidad se vuelva menos abrupta, produciendo así más deslizamiento a medida que la carga del motor aumenta. En general la reducción del torque es proporcional al cuadrado de la reducción de la velocidad, este método requiere una carga con una característica de torque vs velocidad en aumento.



CURVA DE CARGA VS VELOCIDAD EN AUMENTO APROPIADA

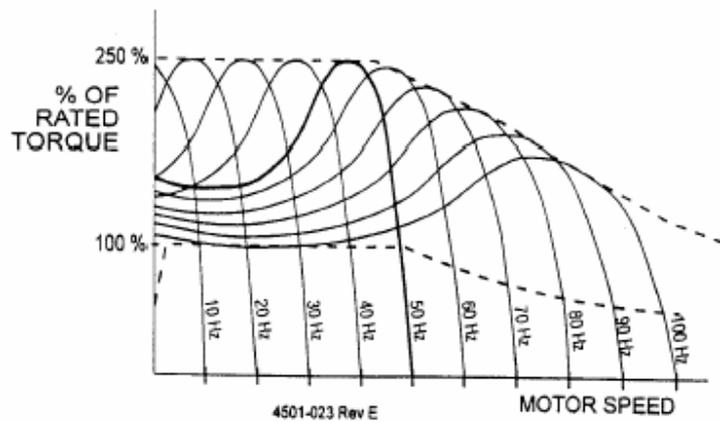
c) Ajuste de la frecuencia de alimentación del motor.

Este es el método usado por los variadores de velocidad electrónicos. Se genera una familia completa de curvas Torque vs Velocidad, cada una con una velocidad de sincronismo correspondiente a la frecuencia suministrada al motor en cualquier instante. Este es el mejor método de control de velocidad, por las siguientes razones:

- Se mantiene una alta eficiencia a través del rango de velocidades
- Se dispone de control variable de velocidad continuo. Este puede ser controlado electrónicamente, mediante una señal de 0-10 V o 4-20 MA
- El torque de motor disponible es mantenido, aun a bajas velocidades. Así es adecuado para el uso de cargas de cualquier característica de torque
- Se pueden lograr velocidades mayores que la “velocidad base” (a la frecuencia fundamental) aunque con el costo de una reducción del torque total disponible aumentando la frecuencia mas allá de la frecuencia fundamental.

A.1 Control de velocidad mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación

Mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación que es suministrada al motor a inducción, se ajusta la velocidad sincrónica del motor. Esto brinda un aumento en las curvas torque vs velocidad del motor como se muestra en la siguiente grafica.



CURVAS DE TORQUE VS VELOCIDAD VARIANDO LA FRECUENCIA

A.2 El convertidor de frecuencia



Los convertidores de frecuencia son controladores electrónicos, que regulan la velocidad y el par de los motores de corriente alterna convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de la red de distribución de electricidad en magnitudes infinitamente variables.

Existen cuatro tipos de convertidores de frecuencia, que se diferencian según la modulación de la forma de onda:

- Convertidor de frecuencia con modulación por amplitud de pulsos (PAM)

- Convertidor de frecuencia con modulación por anchura de pulsos (PWM)
- Inversor de corriente (CSI)
- Variadores vectoriales

Todos los convertidores de frecuencia utilizan el mismo principio básico, el cual se muestra en la siguiente figura. La red de suministro eléctrico esta conectada con un rectificador que transforma la corriente alterna CA en corriente continua CC, esta corriente se filtra en un circuito intermedio antes de transformarla, en el inversor, en una nueva corriente alterna a frecuencia variable.

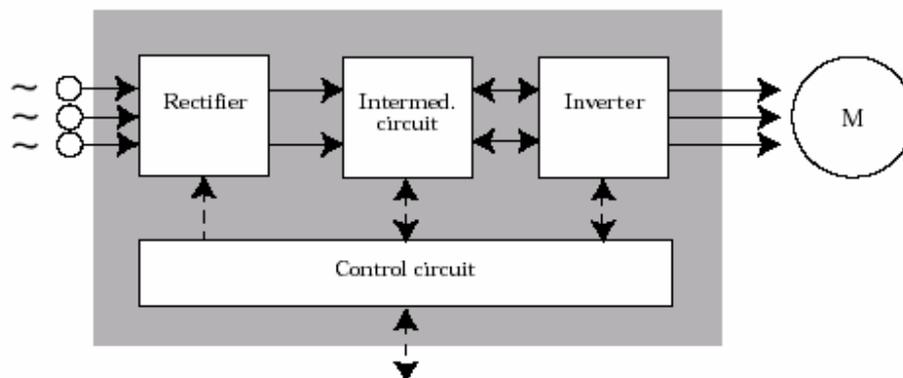


DIAGRAMA DE BLOQUES SIMPLIFICADO

En la siguiente figura se analiza el principio básico de los variadores de velocidad y se dan detalles de la forma como se lleva a cabo la variación de la frecuencia en los mismos a través del diagrama electrónico típico.

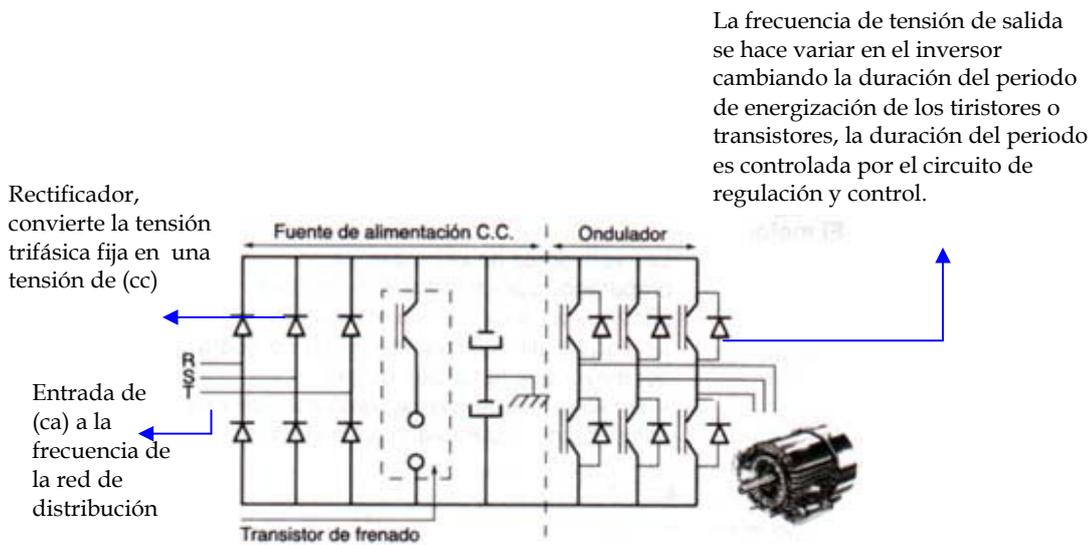
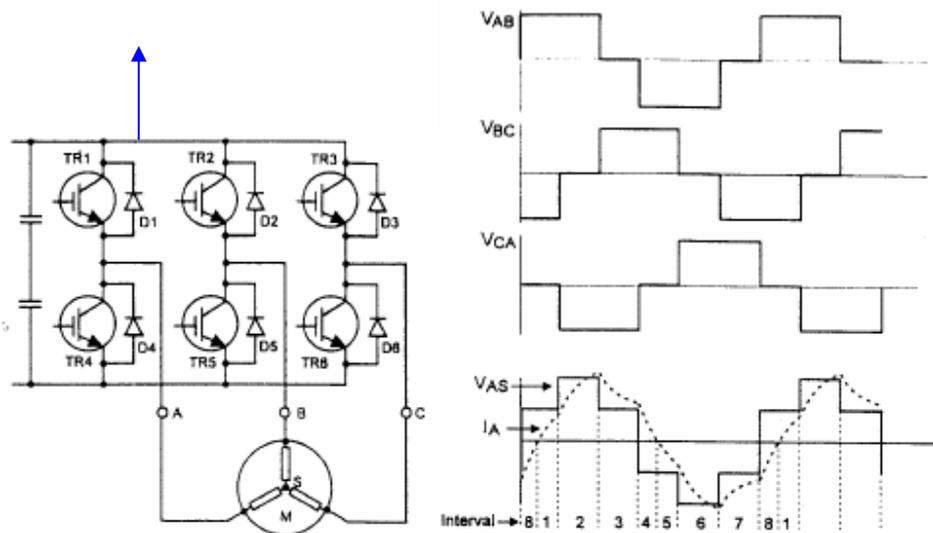


DIAGRAMA ELECTRÓNICO TÍPICO

A.1.2 Modulación de la forma de la onda



TENSIONES Y CORRIENTE DE LINEA Y FASE PARA UN INVERSOR DE ONDA CUASI-CUADRADA

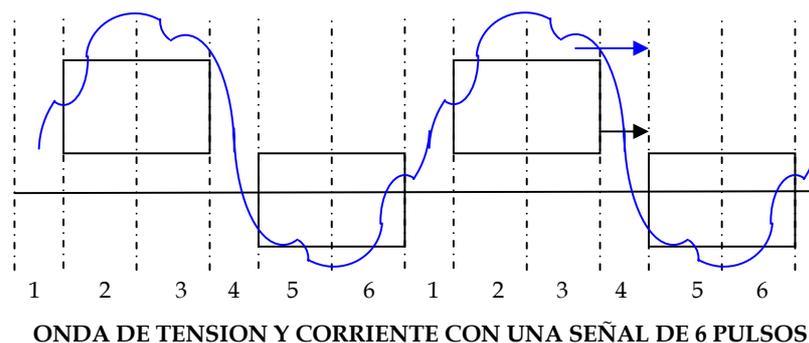
La figura anterior muestra la generación de una forma de onda. Cada contacto es conmutado a la frecuencia de salida requerida, a un ciclo de trabajo 50-50. Note

que la forma de la onda de tensión resultante se desvía de ser una onda senoidal, esto es, tiene un alto contenido armónico. Esta distorsión armónica no es deseable porque puede causar calentamiento excesivo en los bobinados del motor, y las pulsaciones de flujo acompañantes en el motor pueden causar ruido magnético en las laminaciones y bobinados.

La forma de la onda de tensión y corriente de salida del variador es un ancho de pulso modulado con altibajos. Estos altibajos son de tamaño variable para hacer que la corriente de salida se parezca más a una onda senoidal.

A.1.3 Convertidor de frecuencia con modulación por amplitud de pulsos (PAM)

En el convertidor de frecuencia por amplitud de pulsos, el control de la frecuencia de tensión de salida se hace variar en el inversor, cambiando la duración del periodo en el que, los tiristores o transistores son energizados. Las señales de salida normalmente están constituidas por seis pulsos o por 18 pulsos durante cada periodo (dependiendo del convertidor).

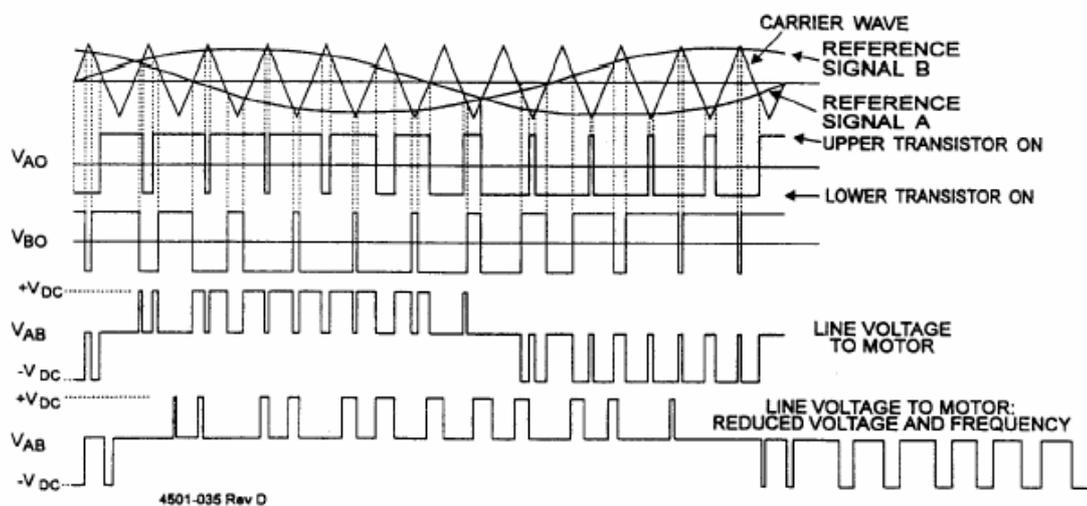


la forma de la onda de la corriente en un convertidor PAM es como se muestra en la figura debido a que al mismo tiempo es alimentado con otras tensiones a frecuencias diferentes a la fundamental, también llamadas frecuencias armónicas.

Una manera de reducir los efectos secundarios de las frecuencias armónicas es introduciendo un número mayor de pulsos en la tensión del motor (el regulador de velocidad de 18 pulsos).

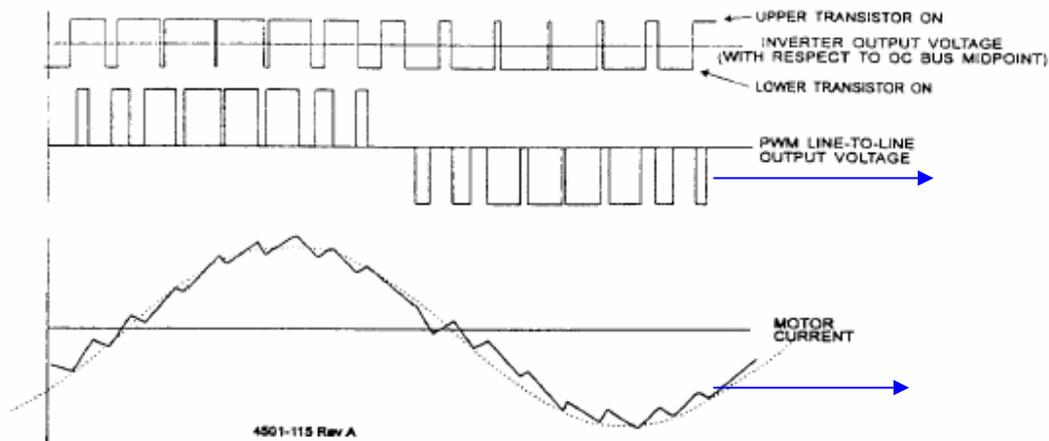
A.1.4 Convertidor de frecuencia con modulación por anchura de pulsos (PWM)

En este método de modulación una forma de onda triangular es comparada con una forma de onda senoidal (ver figura). Cuando la senoidal excede la triangular, el contacto superior de la fase es energizado. Cuando la onda triangular excede la senoidal, el contacto inferior es energizado, en este tipo de convertidores la forma de la onda de corriente es muy cercana a la senoidal con muy poca distorsión.



MODULACION DE LA FORMA DE LA ONDA EN UN CONVERTIDOR PWM

Una forma de onda de corriente típica se muestra en la siguiente figura.



FORMA DE LA ONDA DE CORRIENTE CON UN CONVERTIDOR PWM

En esta forma de modulación el motor además de la frecuencia básica, estará también sometido a frecuencias armónicas indeseables, teniendo en cuenta que las frecuencias armónicas altas son menos importantes que las armónicas bajas, en cuanto a efectos secundarios ocasionan, el convertidor de frecuencia por anchura de pulsos reduce el número de frecuencias bajas.

A pesar del número reducido de frecuencias armónicas bajas, se producen pérdidas suplementarias en el motor, y esto se ilustra por la recomendación de los fabricantes de los convertidores de frecuencia PWM de procurar que los motores que se encuentren funcionando de manera continua no estén sometidos a una carga superior del 85-95% del par nominal.

Entre los variadores PWM es posible eliminar totalmente dos frecuencias armónicas bajas, (la quinta y la séptima) pero la eliminación de las frecuencias produce un aumento en la amplitud de las frecuencias armónicas restantes.

Ventajas del convertidor PWM:

- El motor funciona de manera suave, incluso a bajas velocidades
- Son apropiados para el funcionamiento de motores en paralelo, solo si la corriente de arranque no da lugar a la limitación de la corriente.

- Buen rendimiento del sistema

Inconvenientes:

- Motor ruidoso en razón de la curva de tensión.

A.1.5 Inversor de corriente (CSI)

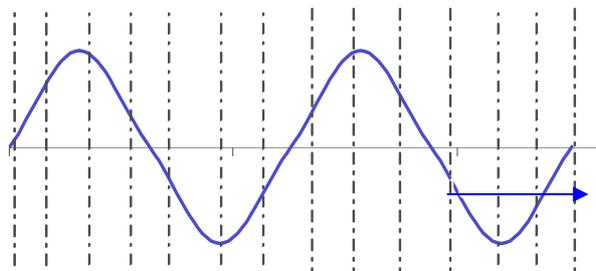
En el funcionamiento usual de los motores de inducción la tensión permanece constante y la corriente varía dependiendo de la carga del motor, En este caso la situación será inversa, la carga determinará la tensión que se le aplica al motor y la corriente permanecerá constante. Las cargas elevadas exigirán tensiones de motor elevadas.

Convertidores de frecuencia CSI:

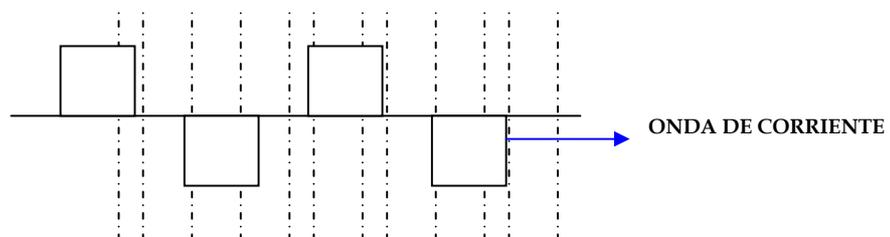
Carga del motor variable = tensión variable * corriente constante

Convertidores de frecuencia PAM y PWM

Carga del motor variable = corriente variable * tensión constante



TENSIÓN DE FASE EN UN CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CSI



CORRIENTE DEL MOTOR EN UN CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CSI

Anteriormente era la corriente de fase que tenía una forma senoidal, es ahora la tensión de fase la que la tiene (ver figuras). Sin embargo se producirán algunas crestas de tensión elevada en el momento del establecimiento y de la interrupción de la corriente en las fases individuales.

Un convertidor de frecuencia CSI no es apropiado para funcionamiento de motores en paralelo, los efectos secundarios de las frecuencias armónicas son de la misma magnitud que en un convertidor de frecuencia PAM.

Este tipo de variador presenta las siguientes ventajas:

- El convertidor es a prueba de cortocircuitos porque funciona a corriente constante.
- Buen rendimiento del sistema
- El motor funciona de manera silenciosa

Inconvenientes:

- Utilización limitada en el caso de motores en paralelo
- A velocidades lentas se producen indeseables variaciones periódicas del par
- Genera importantes perturbaciones y pérdidas en la red de distribución eléctrica
- Reacción lenta a los cambios de carga.

1.6 Variadores vectoriales

Bajo condiciones dinámicas, cualquier cambio variable hecho en el convertidor debe ser hecho lentamente, de otra manera puede resultar en una operación inestable, la velocidad del motor es controlada mediante el ajuste de la frecuencia y tensión de salida, y la salida de torque es debido al cambio de deslizamiento.

Los convertidores de frecuencia anteriores no son adecuados para aplicaciones donde el control del torque de salida sea una función importante, incluyendo que las características de torque a bajas velocidades y con motor detenido no son muy buenas en este tipo de convertidores.

En un controlador vectorial se requiere que el torque producido y los componentes de magnetización de torque deben ser controlados precisa y separadamente como vectores, (estos son controlados tanto en magnitud como en posición espacial) principalmente los dos componentes son mantenidos en cuadratura (a 90° eléctricos uno de otro)

Este tipo de controlador tiene una respuesta de torque muy rápida, haciéndolo adecuado para aplicaciones de control de precisión de torque y velocidad. Genera una forma de onda mejor, con menos conmutaciones que la modulación sinusoidal.

Las ventajas de la modulación del espacio vectorial sobre la modulación sinusoidal pueden ser:

Reducidas corrientes armónicas al motor: esto resulta en pérdidas reducidas en el cobre del motor. Esto es por una modulación de frecuencia más efectiva para una conmutación dada.

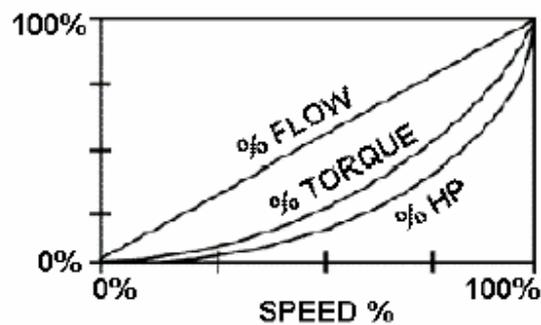
Reducido ruido de ripple de torque: las pulsaciones de torque son menores cuando se usa la técnica de modulación del espacio vectorial, como resultado el motor es considerablemente mas silencioso que uno controlado por modulación sinusoidal.

A.2 Beneficios logrados con los variadores de velocidad

- Ahorro de energía. El ahorro de energía depende en gran parte del tipo de carga que se aplica, puede ser dividida en dos grandes grupos, torque constante y torque variable, la energía ahorrada para aplicaciones de potencia o torque variable es mucho más representativa que para aquellas aplicaciones por torque constante.

En aplicaciones de potencia variable, el torque requerido varía en forma proporcional a la velocidad al cuadrado, y la potencia requerida varia en forma proporcional a la velocidad al cubo, resultando en una reducción de los caballos de

fuerza por cada reducción pequeña de velocidad. El motor consumirá solo el 25% de la misma cantidad de energía en 50% de velocidad, en comparación con lo que será a 100% de velocidad. Esto esta referido a las leyes de afinidad.



RESULTADOS AL CAMBIAR LA VELOCIDAD EN UN MAQUINA CENTRÍFUGA

Como lo muestra la figura anterior los variadores de velocidad permiten consumir menos energía en comparación con otras técnicas de control de velocidad, cuando los requerimientos de carga son menores que trabajar a toda velocidad, como es el caso de muchas aplicaciones.

- Seguro control del proceso. Permite tener un control preciso sobre el proceso, se obtienen altos niveles de exactitud en aplicaciones en el que los controladores ofrecen una aplicación en lazo cerrado.
- Pueden ser programados para acelerar el motor gradualmente y llevarlo hasta la velocidad de operación, reduciendo los costos por mantenimiento y reparación, extendiendo la vida útil del equipo y del equipo controlador.

A.3 Efectos negativos de los variadores de velocidad.

Los efectos negativos de los variadores de velocidad están relacionados con la inyección de armónicos en la red eléctrica.

Las componentes armónicas son funciones senoidales adicionales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

El problema fundamentalmente radica en el que las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica absorben corrientes en impulsos bruscos. Estos impulsos crean ondas de corriente distorsionadas que originan a su vez corrientes de armónicos de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

Los principales inconvenientes de los armónicos se pueden resumir:

Efectos cuasi-instantáneos:

- Fallo de interruptores automáticos
- Operación incorrecta de contactores y relés
- Interferencia con sistemas de comunicación

Efectos medios:

- Calentamiento y hasta destrucción de condensadores por sobre-tensión
- Sobrecalentamiento y averías en transformadores
- Calentamiento en motores de inducción
- Intensidades en los conductores de neutro, incluso en redes equilibradas causadas por los armónicos triples.

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas puede percibirse considerando lo siguiente:

Una elevación de sólo 10°C de la temperatura máxima del aislamiento de un conductor reduce a la mitad su vida útil.

Un aumento del 10% de la tensión máxima del dieléctrico de un condensador reduce a la mitad su vida útil.

- Errores de medición de energía activa, reactiva y factor de potencia en los instrumentos con poco ancho de banda o basados en el valor medio.

ANEXO B

MANUAL DE PROGRAMACION DEL SIMEAS P

Operation (7KG75xx and 7KG76xx)

2

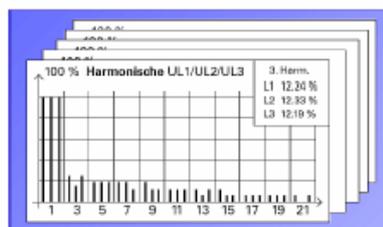
This chapter describes how to operate the devices 7KG75xx and 7KG76xx. The devices 7KG7100 and 7KG7200 may be parameterized and operated via PC only.

2.1	Screen Displays	31
2.2	Screen Content.....	31
2.2.1	Screen types	31
2.2.2	2 Measured Values - Digital.....	32
2.2.3	2 Measured Values - Digital / Analog.....	32
2.2.4	4 Measured Values - Digital.....	32
2.2.5	4 Measured Values - Digital / Analog.....	32
2.2.6	Phasor Diagram	32
2.2.7	Harmonics Screens.....	33
2.2.8	Min – Max Values.....	33
2.2.9	Oscilloscope.....	34
2.2.9.1	General	34
2.2.9.2	Oscilloscope Menu.....	35
2.2.9.3	Characteristics of "Instantaneous Value" Recording	36
2.2.9.4	Characteristics of "RMS Value" Recording.....	37
2.2.10	Status Bar	38

2.1 Screen Displays

Once the SIMEAS P has been programmed (see Chapter 4) and connected (see Chapter 1), the measured quantities selected by the user are displayed on screens.

- Specific screens can be selected via the two front arrow buttons.
- Press an arrow button once to display the next or previous screen.
- Hold an arrow button down to scroll through the screens automatically.
- If desired, automatic scrolling can be programmed for normal display.
- When scrolling, the screens are arranged in a loop format (i.e., the first screen follows the last in one direction, whereas the last screen follows the first in the opposite direction, etc.).



2.2 Screen Content

The user must be able to read all relevant information at a glance for a specific monitoring application.

For this reason, each screen can be easily customized to fit the specific needs of the user. The total number of screens (maximum of 20), as well as the type and content of each individual screen, are programmed by the user.

The following screen types are available:

2.2.1 Screen types

- 2 Measured Values - Digital
- 2 Measured Values - Digital / Analog
- 4 Measured Values - Digital
- 4 Measured Values - Digital / Analog
- Phasor Diagram
- Harmonics - V & I
- Min – Max Values
- Oscilloscope (waveform/RMS values)

Note:

- For devices with the ordering number 7KG76** the Oscilloscope can be found in the Datalogger group (see section 5.1, page 68).

2.2.2 2 Measured Values - Digital

- Display of any two measured quantities from the Measured Quantities table (see Chapter 3).



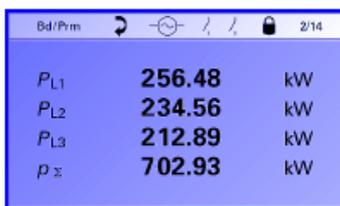
2.2.3 2 Measured Values - Digital / Analog

- Status Bar for the SIMEAS P
- Display of any two measured quantities from the Measured Quantities table.
- Programmable low and high values for each analog bar.



2.2.4 4 Measured Values - Digital

- Status Bar for the SIMEAS P
- Display of any four measured quantities from the Measured Quantities table.



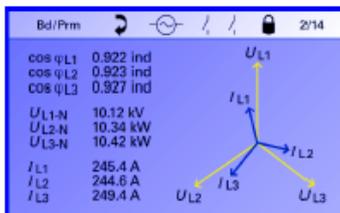
2.2.5 4 Measured Values - Digital / Analog

- Status Bar for the SIMEAS P
- Display of any four measured quantities from the Measured Quantities table.
- Programmable low and high values for each analog bar.



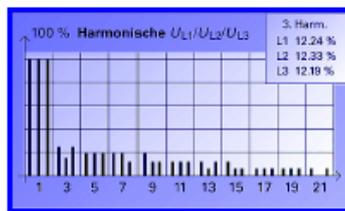
2.2.6 Phasor Diagram

- This screen displays the overall status of the system at a glance



2.2.7 Harmonics Screens

- Graphical display of current or voltage harmonic components.
- Display of all odd harmonics in all phases up to the 21st harmonic.
- When ENTER is pressed, a window appears in the upper right corner of the screen indicating the digital values of a specific harmonic for all three phases. To enter the Main Menu of Level 2 from this screen, hold the ENTER key down.
- Via the arrow   buttons, any odd harmonic up to the 21st can be selected for display in this window.
- Graphical display is in % where 100% represents the highest value of the first harmonic (fundamental) existing in any one of the three phases. For digital values, voltages are expressed in % and currents are expressed in A.
- The 5th, 7th, 11th, 13th, 17th, and 19th harmonics (which are considered important in the standards) can also be displayed individually as measured quantities on the measured values screens if desired.



2.2.8 Min – Max Values

- Up to 8 measured quantities from the Measured Quantities tables (except energy and metered values) can be monitored here.
- The minimum, average and maximum values since recording was last initiated are displayed for a specific measured quantity.
For devices 7KG76xx the values remain valid in case of a power failure.
- Recording is initiated via "Reset" of the Min – Max Values at the programming level or when the device is switched on.
- If no time is set, the duration of the recording is indicated in hours and minutes. If the time is set, the date and time of recording initiation are indicated.
- Any number of listing screens can be programmed for Min-Max Values.
- Using space lines in place of measured quantities for every other row provides a clearer overview of the representation.

	Min.	Mtl.	Max.	1:32
U_{L1-N}	10.34	10.38	10.64	kV
U_{L2-N}	10.25	10.42	10.78	kV
U_{L3-N}	10.19	10.48	10.73	kV
I_{L1}	36.5	46.72	48.59	A
P_{Σ}	564.41	753.82	822.80	kW
Q_{Σ}	318.37	377.81	378.06	kvar
S_{Σ}	648.01	843.20	902.19	kVA
$\cos \varphi_{\Sigma}$	+0.871	+0.894	+0.912	

2.2.9 Oscilloscope

Note:

- For devices with the ordering number 7KG76** the Oscilloscope can be found in the Datalogger group (see section 5.1, page 68).

2.2.9.1 General

The oscilloscope represents a special screen. Only one oscilloscope screen can be selected. To program settings for the oscilloscope, select the Oscilloscope screen, press ENTER, and the Oscilloscope Menu screen will appear for data entry.

- Three measured quantities are always recorded.
- The amplitude scale of each measured quantity is established automatically.
- Display of the value of each measured quantity is obtained via the cursor.
- In general, 10% of the recording is allocated to pre-triggering history.
- Only one recording is possible. When initiating a new recording, the previous one is deleted.
- When triggering the oscilloscope via limit violation, the recording can also be executed in the background.
- Only the first of several limit violations that trigger a recording is recorded. Further violations are ignored. A new recording must be initiated in the Oscilloscope Menu via "OK + Enable".
- The total duration of a recording, including the pre-trigger and post-trigger history, is limited to 7,040 samples for instantaneous values and 14,000 samples for RMS values, per measured quantity.

Note:

- For devices with the ordering number 7KG76xx the memory range can be set by the user.

2.2.9.2 Oscilloscope Menu

Recording Mode

- Instantaneous Values
- RMS Values

Measurement 1 to 3

- Selected from the Measured Quantities table (depends on recording mode)

```

* Recording Mode : Instant. value
* Measurement 1 : Van
* Measurement 2 : Ib
* Measurement 3 : Vgn
* Trigger : manual
* Length : 0 : 0 : 2
< Zoom off
< Cursor off
< Cancel
< OK + Enable
< Main Menu

```

Trigger

- Manual (select "OK + Enable" and press ENTER)
- Limit Values 1 to 6. Upon selection and confirmation, an input window appears for modifying or confirming the limit value settings and logical relationships, the bandwidth setting, the filter time, and the pulse length. (see Chapter 4 - "Input Window for Limit Values" for more details).

Recording Time

- The recording time depends on the recording mode.
- For instantaneous values, the recording time is fixed to 2 seconds (except for the devices 7KG76xx).
- For RMS values, the recording time can be adjusted up to 4.0 hours (except for the devices 7KG76xx).

Zoom

- If the zoom function is activated (set to "on"), the time axis can be adjusted within the minimum and maximum limits via the arrow buttons ▼ ▲

Cursor

- If the cursor is activated (set to "on"), the cursor can be moved along the time axis by using the arrow buttons ▼ ▲. If the button is pressed once, the cursor moves by one position. If the button is held down, the cursor moves continuously with increasing speed.
- The values of the measured quantities are automatically displayed on the Y-axis for the corresponding cursor position.

Cancel

- Select "Cancel" if the modified settings in the menu are not correct. When "Cancel" is selected, the oscilloscope screen will reappear.

OK + Enable

- Select "OK + Enable" if the modified settings in the menu are correct. When "OK + Enable" is selected, the recording is initiated and the oscilloscope screen will reappear.

Main Menu

- The user can access the Main Menu of Level 2 from the Oscilloscope Menu screen by selecting Main Menu and pressing ENTER.

2.2.9.3 Characteristics of "Instantaneous Value" Recording

- Recording time 7KG75xx
Recording time cannot be changed and is fixed to approximately 2 seconds (200 ms of pre-trigger history and approximately 1800 ms of post-trigger history - 7,040 samples per measured quantity).
- Recording time 7KG76xx
Recording time can be parameterized. The recording time to be saved in the allocated memory is calculated according to the following formula:

$$t_{MAX} [s] = \frac{AllocatedMemory[Byte]}{64 * 16Byte * 50}$$

- The time axis on the screen can be changed via "Zoom" from 60 ms to 2000 ms

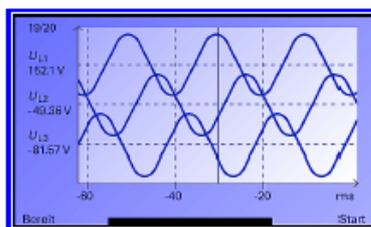
Sampling Points

The sampling rate is adjusted such that there are 64 samples per cycle. Therefore, the sampling rate is as follows for 50 Hz and 60 Hz respectively:

- at 50 Hz = 3.20 kHz
- at 60 Hz = 3.84 kHz

Trigger via Limit Violation:

The RMS value of each half wave is calculated and tested for Max/Min violations. If a violation is detected, recording is triggered immediately. The bandwidth and filter time settings are irrelevant here.



Note:

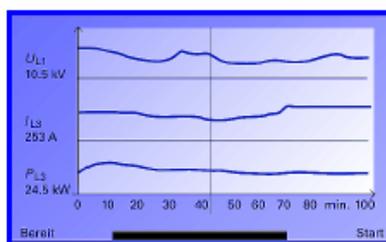
- The recording type "Instantaneous value" allows to record the measurement values "current" and "voltage" only.

2.2.9.4 Characteristics of "RMS Value" Recording

- Any three measured quantities can be selected from the Measured Quantities table with the exception of energy and metered values.
- Recording time 7KG75xx
Recording time can be modified up to a maximum of 3 hours 59 minutes (approximately 14,000 samples per measured quantity)
- Recording time 7KG76xx
Recording time can be parameterized. The recording time to be saved in the allocated memory is calculated according to the following formula:

$$t_{MAX} [h] = \frac{AllocatedMemory[Byte]}{8Byte * 3600}$$

- One sample of a measured quantity is saved each second.
- Pre-trigger history is always 10% of the selected recording time.
- The time axis on the screen can be changed via the "Zoom" function:

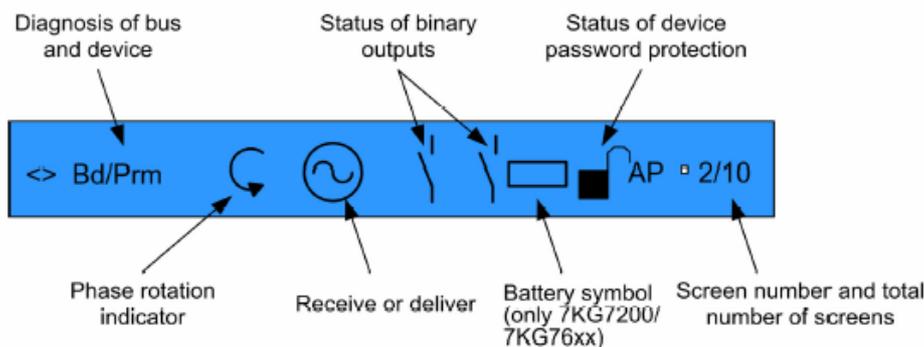


Notes:

- Since 10% of the recording time is always allocated to pre-trigger history, the time for recording the pre-trigger history must expire before a new recording can be triggered.
- The minimum time resolution on the display for a specific recording event is limited by the number of pixels (approximately 200). That is, 1 pixel = 1second per measured value. Therefore, the shortest time period that can be displayed on the time axis is approximately 3 minutes. For recording times less than 3 minutes, only a part of the display width is used for recording.
- The recording type "RMS Value" does not allow to record analog inputs (7KG7610 and 7KG7660 only).

2.2.10 Status Bar

All screens other than the Harmonics and Oscilloscope screens feature a status bar that displays the status of the SIMEAS P.



"<>"	Serial transmission was received.
"Bd"	Searching for the Profibus baud rate
"Cfg"	Waiting for the correct configuration of Profibus
"Prm"	Waiting for the correct parameters of Profibus
"()"	Direction of rotation from V1 to V2; Va to Vn
	Receive (this symbol) or Deliver
	Limit violation (the limit violation is displayed and not the status of the output contact)

If the battery voltage falls below the defined threshold a blinking battery symbol will be displayed in the status. Please replace the battery in this case (see section 1.5.10, page 28).

If the password protection is active (see 4.3.1.5, 5.5.3 and 6.7.2), a lock with a closed fastener will be displayed.

„A“	Recording of average values active
„P“	Recording of power values active

ANEXO C

MEDICIONES QUE SE PUEDEN REALIZAR CON EL SIMEAS P SEGÚN EL TIPO DE CONEXIÓN Y PROGRAMACION

Measured Quantities

3

3.1	Measured Quantities that Depend on the Input Connection Type.....	40
3.2	Formulas and Calculation of Derived Quantities.....	43
3.2.1	Calculation of Derived Quantities.....	43
3.3	Connection Modes.....	47
3.3.1	Four-wire Three-phase Current with Any Load.....	47
3.3.2	Single-phase AC.....	47
3.3.3	Four-wire Three-phase Current with Symmetrical Load.....	47
3.3.4	Three-wire Three-phase Current with Symmetrical Load.....	47
3.3.5	Three-wire Three-phase Current with Any Load.....	48
3.4	Measured Values.....	49

3.1 Measured Quantities that Depend on the Input Connection Type

Table 3-1: Measured Quantities that Depend on the Input Connection Type

#°	Measured Quantity	1-phase AC current	Three-wire Three-phase- Balanced	Three-wire Three-phase Unbalanced 3I	Three-wire Three-phase Unbalanced 2I	Three-phase Four-wire Balanced	Three-phase Four-wire Unbalanced	Comments
1	(space line)*	X	X	X	X	X	X	
2	Voltage (A-N)	X				X	X	V _{an}
3	Voltage (B-N)						X	V _{bn}
4	Voltage (C-N)						X	V _{cn}
5	Voltage (G-N)	X	X	X	X	X	X	V _{gn}
6	Voltage (A-B)		X	X	X		X	V _{ab}
7	Voltage (B-C)		X	X	X		X	V _{bc}
8	Voltage (C-A)		X	X	X		X	V _{ca}
9	Average Voltage (ϕ -N)*		$\Sigma\phi$ -N/3	$\Sigma\phi$ -N/3	$\Sigma\phi$ -N/3	A-N	$\Sigma\phi$ -N/3	V _{φn}
10	Current (A)	X	X	X	X	X	X	I _a
11	Current (B)			X	X		X	I _b
12	Current (C)			X	X		X	I _c
13	Average Current *			X	X		$I\Sigma / 3$	I _φ
14	Neutral Current			X			X	3I ₀
15	Real Power (A _φ)	X					X	P _a
16	Real Power (B _φ)						X	P _b
17	Real Power (C _φ)						X	P _c
18	Real Power (3N)		X	X	X	X	X	P _{3φ}
19	Reactive Power (A _φ)	X					X	Q _a
20	Reactive Power (B _φ)						X	Q _b
21	Reactive Power (C _φ)						X	Q _c
22	Reactive Power (3N)		X	X	X	X	X	Q _{3φ}
23	Apparent Power (A _φ)	X					X	S _a
24	Apparent Power (B _φ)						X	S _b
25	Apparent Power (C _φ)						X	S _c
26	Apparent Power (3N)		X	X	X	X	X	S _{3φ}
27	cos ϕ (A _φ)*	X					X	Cos(ϕ _a)
28	cos ϕ (B _φ)*						X	Cos(ϕ _b)
29	cos ϕ (C _φ)*						X	Cos(ϕ _c)
30	cos ϕ (3 ϕ)*		X	X	X	X	X	Cos(ϕ)
31	Power Factor (A _φ)*	X					X	PF _a
32	Power Factor (B _φ)*						X	PF _b
33	Power Factor (C _φ)*						X	PF _c
34	Power Factor (3 ϕ)*		X	X	X	X	X	PF _{3φ}
35	Phase Angle (A _φ)	X					X	ϕ _a
36	Phase Angle (B _φ)						X	ϕ _b
37	Phase Angle (C _φ)						X	ϕ _c
38	Phase Angle (ϕ)		X	X	X	X	X	ϕ
39	System Frequency	X	X	X	X	X	X	Freq
40	Asymmetrical Voltage						X	ASymV
41	Asymmetrical Current						X	ASymI
42	THD Voltage (A-N)	X					X	THD V _{an}
43	THD Voltage (B-N)						X	THD V _{bn}
44	THD Voltage (C-N)						X	THD V _{cn}
45	THD Current (A _φ)	X					X	THD I _a

#°	Measured Quantity	1-phase AC current	Three-wire Three-phase- Balanced	Three-wire Three-phase Unbalanced 3	Three-wire Three-phase Unbalanced 2	Three-phase Four-wire Balanced	Three-phase Four-wire Unbalanced	Comments
46	THD Current (B ϕ)						X	THD Ib
47	THD Current (C ϕ)						X	THD Ic
48	Harmonic Voltage (A-N)*	X	X	X	X	X	X	HVan 5,7,11,13,17,19
49	Harmonic Voltage (B-N)*			X	X		X	HVbn 5,7,11,13,17,19
50	Harmonic Voltage (C-N)*			X	X		X	HVcn 5,7,11,13,17,19
51	Harmonic Current (A ϕ)*	X	X	X	X	X	X	Hla 5,7,11,13,17,19
52	Harmonic Current (B ϕ)*			X	X		X	Hlb 5,7,11,13,17,19
53	Harmonic Current (C ϕ)*			X	X		X	Hlc 5,7,11,13,17,19
54	kWh received (A ϕ)*	X					X	kWh a rec.
55	kWh received (B ϕ)*						X	kWh b rec.
56	kWh received (C ϕ)*						X	kWh c rec.
57	kWh received (3 ϕ)*		X	X	X	X	X	kWh 3 ϕ rec.
58	kWh delivered (A ϕ)*	X					X	kWh a del.
59	kWh delivered (B ϕ)*						X	kWh b del.
60	kWh delivered (C ϕ)*						X	kWh c del.
61	kWh delivered (3 ϕ)*		X	X	X	X	X	kWh 3 ϕ del.
62	Total kWh (A ϕ)*							kWh a tot.
63	Total kWh (B ϕ)*							kWh b tot.
64	Total kWh (C ϕ)*							kWh c tot.
65	Total kWh (3 ϕ)*							kWh 3 ϕ tot.
66	Net kWh received (3 ϕ)*	X	X	X	X	X		kWh 3 ϕ net
67	kVARh lagging (A ϕ)	X					X	kVARh a lag.
68	kVARh lagging (B ϕ)						X	kVARh b lag.
69	kVARh lagging (C ϕ)						X	kVARh c lag.
70	kVARh lagging (3 ϕ)		X	X	X	X	X	kVARh 3 ϕ lag.
71	kVARh leading (A ϕ)	X					X	kVARh a lead.
72	kVARh leading (B ϕ)						X	kVARh b lead.
73	kVARh leading (C ϕ)						X	kVARh c lead.
74	kVARh leading (3 ϕ)		X	X	X	X	X	kVARh 3 ϕ lead.
75	Total kVARh (A ϕ)*	X					X	kVARh a tot.
76	Total kVARh (B ϕ)*						X	kVARh b tot.
77	Total kVARh (C ϕ)*						X	kVARh c tot.
78	Total kVARh (3 ϕ)*		X	X	X	X	X	kVARh 3 ϕ tot.
79	Total kVAh (A ϕ)	X					X	kVAh a
80	Total kVAh (B ϕ)						X	kVAh b
81	Total kVAh (C ϕ)						X	kVAh c
82	Total kVAh (3 ϕ)		X	X	X	X	X	kVAh 3 ϕ
83	Counter 1 / 2 / 3 / 4*	X	X	X	X	X	X	Cntr.1,2,3,4
84	Binary inputs	X*	X*	X*	X*	X*	X*	
85	Analog inputs	X*	X*	X*	X*	X*	X*	

* Explanation to Table 3-2

#	Name	Description
1	(space line)	If a space line is selected as a measured quantity, the corresponding fields remain empty on the display screens.
9	Average Voltage (ϕ -N)	The average value of the three phase-to-neutral voltages (ϕ -N) is displayed here. For three-wire, three-phase connection types, this value is calculated
13	Average Current	The average value of the three phase currents is displayed here.
27 to 34	$\cos\phi$ vs. Power Factor	The measured value $\cos\phi$ has the same magnitude as the power factor, but will become negative if real power flow is reversed. Power factor is always a positive quantity, and is equal to the absolute value of $\cos\phi$
48 to 53	Harmonics V/I	For harmonics up to the 21st, the standards (IEC 61000-2-2 and EN 50160) specify compatibility levels only for harmonics of orders 5, 7, 11, 13, 17, and 19. Those of even order and those divisible by 3 are considered irrelevant. Therefore, on the "Harmonics" screen, selection is limited to all uneven orders up to the 21st. The selection of single harmonics on the measured values screens is limited to the 5th, 7th, 11th, 13th, 17th and 19th. For voltage harmonics, values are displayed as a percentage of the first harmonic. For current harmonics, the values are displayed directly in A.
54 to 61	kWh received	The default setting (industry mode) is "Load (standard)" indicated by a positive energy flow direction. You can configure the power supply company mode (refer to 4.3.1.7 and 4.3.1.7). In this mode, a positive value indicates "Generator".
62 to 65	Total kWh	The sum of the absolute values (without sign) of kWh received and kWh delivered.
66	Net kWh received	Net kWh received is equal to kWh received minus kWh delivered. Because this measured value can be negative and can decrease as well as increase, it is not possible to use this measured value to generate pulses via the output contacts.
75 to 78	Total kVARh	The sum of the absolute values (without sign) of leading and lagging kVARh.
83	Counters 1 / 2 / 3 / 4	Number of limit violations
84, 85	Binary inputs, analog inputs	7KG7610/7KG7660 only

3.2 Formulas and Calculation of Derived Quantities

3.2.1 Calculation of Derived Quantities

Table 3-2: Formulas to calculate derived quantities

Line	Derived Quantity	Formula	Note
1	RMS value voltage, distorted waveform included	$V = \sqrt{\frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} u_v^2}$	
2	RMS value voltage, fundamental component U_1 only	$V_1 = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}$	From the Fourier coefficients a and b of the fundamental component
3	RMS value current, distorted waveform included	$I = \sqrt{\frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} i_v^2}$	
4	RMS value current, fundamental component I_1 only	$I_1 = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}$	From the Fourier coefficients a and b of the fundamental component
5	Active power P_{Std}	$P = \frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} v_v i_v$	From sample values
6	Active power P_{Four}	$P = Va_1 Ia_1 + Vb_1 Ib_1$	From the Fourier coefficients of the fundamental component
7	Active power P_{DIN}	$P = \sum_{n=1}^{21} (Va_n Ia_n + Vb_n Ib_n)$	From the Fourier coefficients of the fundamental component and from the harmonics.
8	Reactive power Q_{Std}	$Q = \frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} v_v i_v \cdot e^{-j\frac{1}{2}\pi}$	Standard up to now, additional fault for distortions ¹
9	Reactive power Q_{Four}	$Q = Va_1 Ib_1 + Vb_1 Ia_1$	
10	Reactive power Q_{DIN}	$Q_{tot} = \sum_{n=1}^{21} (Va_n Ib_n + Vb_n Ia_n)$	From the Fourier coefficients of the fundamental component
11	Apparent power S_{Std}	$S = V_{1N} \cdot I_1 + V_{2N} \cdot I_2 + V_{3N} \cdot I_3$	From the RMS values according to line 1 and 3
12	Apparent power S_{Four}	$S = \sqrt{V_{1N}^2 + V_{2N}^2 + V_{3N}^2} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$	From the RMS values according to line 1 and 3
13	Apparent power S_{DIN}	$S = \sqrt{V_{1N}^2 + V_{2N}^2 + V_{3N}^2} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$	From the RMS values according to line 2 and 4
14	Power factor	$\cos \varphi = \frac{ P }{S}$ or $\frac{P_1}{S_{DIN}}$	No sign!
15	Power factor DIN	$\cos \varphi = \frac{ P }{S_{DIN}}$	No sign!
16	Power factor $\cos \varphi$	$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$	Four quadrants according to note 4
17	Phase Angle	$\varphi = \arctan \frac{Q_1}{P_1}$	From the fundamental component only!

¹ According to classic measuring devices (electrodynamical power meter)

Line	Derived Quantity	Formula	Note
18	System Frequency	$f = \frac{N}{T \cdot P}$	Refer to note 1
19	kWh received	$W = \sum_{v=1} P_v \text{ for } P > 0$	The received power will be calculated every second.
20	kWh delivered	$W = \sum_{v=1} P_v \text{ for } P < 0$	The delivered power will be calculated every second.
21	Power without sign	$W = \sum_{v=1} P_v$	Calculation without sign
22	Net kWh received	$W = \sum_{v=1} P_v$	Calculation with sign
23	Asymmetrical voltage U or current I	$V = \frac{G}{M}$	Refer to note 2 Range is 0 to ∞ , avoid division by 0!
24	THD voltage, current	$THD = \sqrt{\frac{M_{tot}^2}{M_1^2} - 1}$	Refer to note 3
25	Harmonics		From Fourier transformation

Note 1:

N: Nominal value of the counting pulses per period at nominal value of the system frequency

T: Nominal value of the period length of the system frequency in μs

P: Counted pulses within one period

Note 2:

Equation 1 $G = \sqrt{A^2 + B^2}$

Equation 2 $A = M_1 + M_2 \cos\left(\varphi_{12} - \frac{2}{3}\pi\right) + M_3 \cos\left(\varphi_{13} + \frac{2}{3}\pi\right)$

Equation 3 $B = M_2 \sin\left(\varphi_{12} - \frac{2}{3}\pi\right) + M_3 \sin\left(\varphi_{13} + \frac{2}{3}\pi\right)$

Equation 4 $M = \sqrt{C^2 + D^2}$

Equation 5 $C = M_1 + M_2 \cos\left(\varphi_{12} + \frac{2}{3}\pi\right) + M_3 \cos\left(\varphi_{13} - \frac{2}{3}\pi\right)$

Equation 6 $D = M_2 \sin\left(\varphi_{12} + \frac{2}{3}\pi\right) + M_3 \sin\left(\varphi_{13} - \frac{2}{3}\pi\right)$

V: Asymmetry

G: Unbalanced system

M: Balanced system

M_n: Vector of the measured quantity, U_{Ln} or I_{Ln}, from Fourier transformation

Note 3:

Derivation of the formula:

Total distortion D according to IEC 61000-2-2:

$$\text{Equation 7} \quad D = \sqrt{\sum_{n=2}^N u_n^2} = \frac{1}{M_1} \sqrt{\sum_{n=2}^N M_n^2}$$

u_n :	U_n/U_1
n :	Order of the harmonic
U_n :	Voltage of the n-th harmonic
U_1 :	Voltage of the fundamental component
N :	40, for SIMEAS P: 21
M_n :	Harmonic (n-th order) of voltage or current
M_1 :	Fundamental component of voltage or current

It is possible to derive the result from the harmonic M_1 and the RMS value M_{ges} of the distorted measured quantity. With the root (**H**) from equation 8:

M_{ges} :	RMS value of the distorted measured quantity U or I
M_1 :	RMS value of the fundamental component of the measured quantity

$$\text{Equation 8} \quad H = \sqrt{M_{ges}^2 - M_1^2}$$

With equation 1:

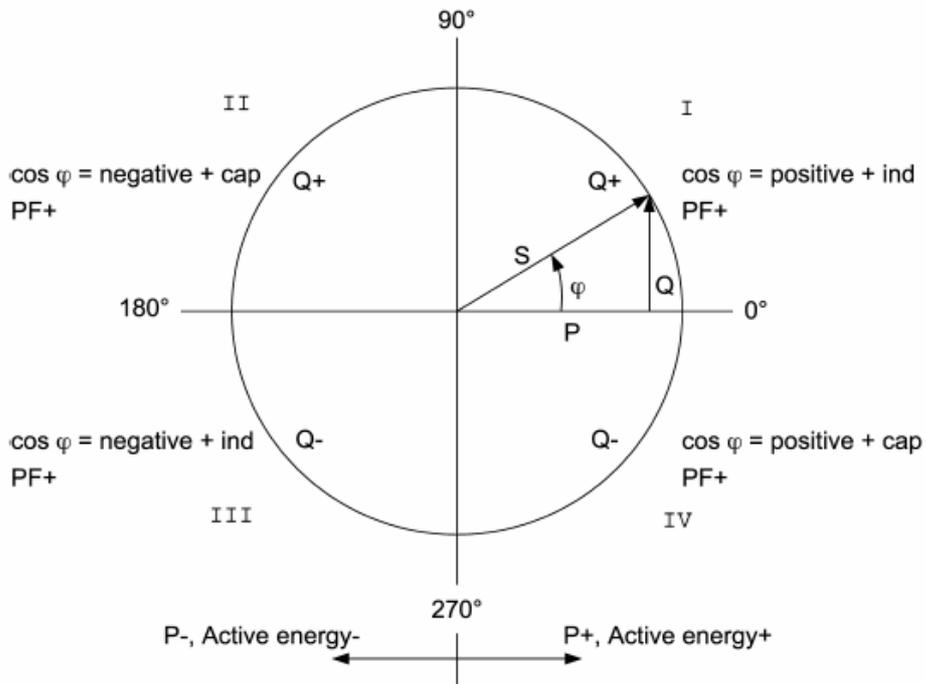
$$\text{Equation 9} \quad THD = \frac{1}{M_1} H = \frac{1}{M_1} \sqrt{M_{ges}^2 - M_1^2}$$

$1/M_1$ under the root:

$$\text{Equation 10} \quad THD = \sqrt{\frac{M_{ges}^2 - M_1^2}{M_1^2}} = \sqrt{\frac{M_{ges}^2}{M_1^2} - 1}$$

provides the THD formula in table 1.

Note 4:
4 Quadrants



3.3 Connection Modes

3.3.1 Four-wire Three-phase Current with Any Load

Depending on the measuring method some quantities to be measured are not available. For the method according to DIN, for example the apparent power S or S are available; only S_{DIN} can be calculated.

3.3.2 Single-phase AC

The measuring path for the voltage is A-N for the voltage and A for the other quantities. This applies also for the power values. The apparent power according to DIN, the reactive power Q_{tot} DIN and the asymmetry are not valid.

3.3.3 Four-wire Three-phase Current with Symmetrical Load

Current A and voltage A-N are available. You can display the same measured quantities as for Single-phase AC. For power Σ , the value calculated from U and I must be multiplied by 3. For power, power factor, $\cos\phi$, phase angle and energy only the sum Σ is relevant. The measurement values Asymmetrical U or I are not available. THD and harmonics can be derived for A only.

3.3.4 Three-wire Three-phase Current with Symmetrical Load

For this connection mode, an artificial neutral point is formed via resistors. Since this internal neutral point is connected to the grounding conductor, it cannot be used here. The reactive power (Standard) can be derived from U_{32} and I_1 .

$$\text{Equation 11} \quad Q = \frac{\sqrt{3}}{64} \sum_{v=1}^{64} u_{32} i_1$$

You have to calculate u_{32} from $u_{3E} - u_{2E}$. To calculate the reactive power for the fundamental Q_1 , the adequate phasors are used. For the reactive power (Standard), sample points are used for the voltage which are shifted by 90° .

$$\text{Equation 12} \quad P = \frac{\sqrt{3}}{64} \sum_{v=1}^{64} u_{32} \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} i_1$$

To calculate the active power of the fundamental P_1 the adequate phasors are used. The measurement values Asymmetrical U or I are not available. THD and harmonics can not be calculated. The apparent power is the multiplication of the RMS values voltage and current, e.g.

$$\text{Equation 13} \quad S = \sqrt{3} \cdot U_{32} \cdot I_1$$

For S_1 , the RMS values of the fundamental component are used; as symmetrical load is supposed $S_{\text{DIN}} = S$.

3.3.5 Three-wire Three-phase Current with Any Load

For this connection mode, the phase-to-ground voltage are not available. Active and reactive power are calculated from the formulas of the two-wattmeter (Aron) circuit:

$$\text{Equation 14} \quad P = \frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} u_{12} i_1 + \frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} u_{23} i_3$$

This is also valid for the calculation via Fourier analysis. For the reactive power according to classic measuring devices (electrodynamic power meter), the following equation is valid:

$$\text{Equation 15} \quad Q = \frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} u_{12} i_1 e^{-j\frac{1}{2}\tau} + \frac{1}{64} \sum_{v=1}^{64} u_{23} i_3 e^{-j\frac{1}{2}\tau}$$

Distortions will cause an additional fault. For the apparent power (classical method), the following equation is valid:

$$\text{Equation 16} \quad S = \sqrt{3}(U_{12} I_1 + U_{23} I_3)$$

For the apparent power according to DIN calculated from the phase voltages, the following equation is valid:

$$\text{Equation 17} \quad S = \sqrt{\frac{1}{3}(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{13}^2)} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$$

In both cases, current B must be calculated from the geometrical sum of the currents –A and –B. To do this, you can sum up the sample points or the Fourier coefficient.

The artificial neutral point does not allow to measure the voltage asymmetry exactly and is not realized. The measured values are only exact, if you use a four-wire net with neutral point. Often the three-wire net is used only to save the cable connection to current transformer 2. Only in this case, it would be useful to measure the asymmetry.

3.4 Measured Values

Table 3-3: Measured values and tolerances

Measured values	Measuring path ¹	Menu	Tolerances ²
Voltage	L1-N, L2-N, L3-N, (N-E)	▼ ■ ●	± 0,1% ² / ± 0,3% ⁷
Voltage	L1-L2, L2-L3, L3-L1, Σ ³	▼ ■ ●	± 0,1% ² / ± 0,3% ⁷
Current	L1, L2, L3, N, Σ ³	▼ ■ ●	± 0,1% ² / ± 0,3% ⁷
Active power P + import, - export	L1, L2, L3, Σ	▼ ■ ●	± 0,5%
Reactive power Q + cap, - ind	L1, L2, L3, Σ	▼ ■ ●	± 0,5%
Apparent power S	L1, L2, L3, Σ	▼ ■ ●	± 0,5%
Power factor cos ϕ ⁴	L1, L2, L3, Σ	▼ ■ ●	± 0,5%
Active power factor cos ϕ ⁴	L1, L2, L3, Σ	▼ ■ ●	± 0,5%
Phase angle ⁴	L1, L2, L3, Σ	▼ ■ ●	± 2°
Frequency ⁵	L1-N	▼ ■ ●	± 10 mHz
Active power import	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Active power export	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Active power absolute	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Active power saldo	Σ	▼ ■	± 0,5%
Reactive power cap	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Reactive power ind	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Reactive power absolute	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Apparent power	L1, L2, L3, Σ	▼ ■	± 0,5%
Unbalance voltage	Four-wire system	▼ ■ ●	± 0,5%
Unbalance current	Four-wire system	▼ ■ ●	± 0,5%
THD voltage	L1, L2, L3	▼ ■ ●	± 0,5%
THD current	L1, L2, L3	▼ ■ ●	± 0,5%
Harmonic voltage U 5. 7. 11. 13. 17. 19. H.	L1, L2, L3	▼ ■ ●	± 0,5%
Harmonic current I 5. 7. 11. 13. 17. 19. H.	L1, L2, L3	▼ ■ ●	± 0,5%
Limit violations	counter 1 to 4	▼ ■	
Analog inputs ⁶	external	▼ ■	± 0,5%
Binary inputs ⁶	external	▼ ■	

1) Phases are displayed based on the type of connection.

2) Tolerances at reference conditions (see chapter 8) are applicable from 0.5 to 1.2 times nominal value.

3) Average value of all phases.

4) Measuring beginning with 2% of the internal apparent power

5) Measuring beginning with 30% of the input voltage L1-N

6) 7KG7610 and 7KG7660 only

7) Limit values for the complete temperature range (see chapter 8) referring to: 0.1 to 1.2 x nominal range.

▼ Measured values can be displayed on measured value screens (only 7KG7500 and 7KG7600)

■ Measured values selectable over communication

● Measured values selectable for list screens and oscilloscope (only 7KG7500 and 7KG7600)

Device Programming 7KG75xx

4

4.1	Operating Notes	51
4.1.1	Button Functions	51
4.1.2	Window Structure	51
4.1.3	Notes	52
4.2	Overview of the Programming Levels.....	53
4.3	Main Menu.....	54
4.3.1	Basic Settings	54
4.3.1.1	Settings Overview	54
4.3.1.2	Input Connections	55
4.3.1.3	Output Contacts	58
4.3.1.4	Communications Interface	59
4.3.1.5	Changing the Password.....	61
4.3.1.6	Calibration.....	61
4.3.1.7	Additional Settings	62
4.3.2	Language / Designation	63
4.3.3	About SIMEAS	63
4.3.4	Date / Time.....	64
4.3.5	Reset.....	64
4.3.6	Programming Screen	65
4.3.6.1	Screen Structure	66

4.1 Operating Notes

This chapter describes all of the setting options of the SIMEAS P that are made via the buttons.



The Main Menu (see section 4.3) of the programming level can be accessed from the Measured Values screens, the Min-Max Values screens or the Phasor Diagram screen via the ENTER button.

In addition, the Main Menu of the programming level can be accessed from the Harmonics screen by holding down the ENTER button, or from the Oscilloscope Menu by selecting "Main Menu" and pressing the ENTER button.

4.1.1 Button Functions

The following functions are performed via the ▼ ▲ buttons:

- Moving the cursor to the entry line.
- Scrolling through selection lists when entering settings.
- Selecting numbers when entering numerical values.

If the buttons are held down, the scrolling continues automatically.

The selected line, setting, or number is confirmed by pressing the ENTER button.

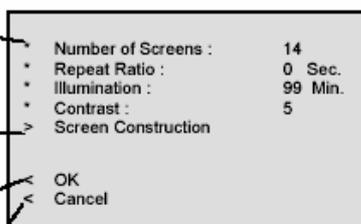
4.1.2 Window Structure

Selecting * and pressing ENTER moves the cursor directly to the data entry field on the same line.

Selecting > and pressing ENTER opens a new window for additional data entry.

Selecting < "OK" and pressing ENTER confirms the settings and returns the user to the previous level.

Selecting < "Cancel" and pressing ENTER cancels the setting changes just made and returns the user to the previous level.

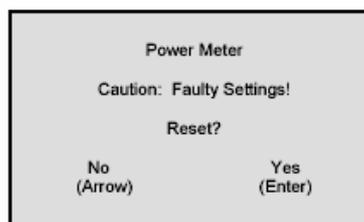


4.1.3 Notes on Parameterization

- The selection of the measured quantity depends on the selected input voltage and current connections.
- If the number selected is too large, "Overflow" is displayed and the input value is automatically set to the maximum value.
- If the power supply voltage is switched off during programming, the message illustrated below appears when the device is restarted. Therefore, the power supply voltage should only be switched off in level 1 (measuring screens).

Select "No" via the ▼ ▲ buttons to retain the settings as they existed prior to the loss of power supply voltage.

Choose "Yes" by pressing the ENTER button to restore the default settings.



Note

This means, that you should always leave the parameter screens completely (OK or Cancel) until the measurement screens are displayed again. This ensures that all parameters will be accepted by the device.



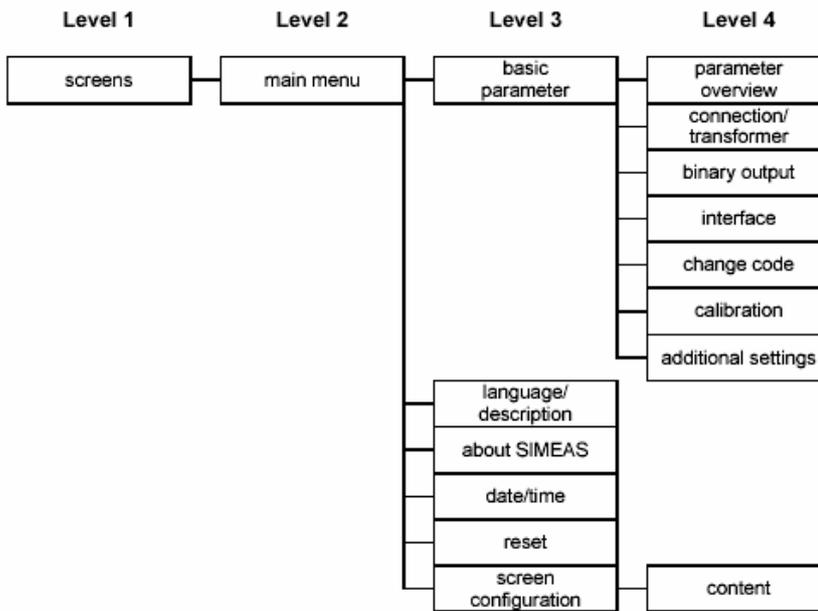
Note

Please check the parameters and the adjustment data afterwards, to ensure the correct function of the SIMEAS P.

If you have adjusted the device manually (refer to section 7.1), these data will not be overwritten by default settings.

4.2 Overview of the Programming Levels

- Level 1 corresponds to the measurement screens
- Levels 2 through 4 correspond to the programming screens and are described as follows:



4.3 Main Menu

The main menu is used to access various submenus.

```
> Basic Settings
> Language / Designation
> About SIMEAS
> Date / Time
> Reset
> Program Screens

< Close
```

4.3.1 Basic Settings

The "Basic settings" submenu is used to access various input screens for device programming

```
> Settings Overview
> Input Connections
> Output Contacts
> Communications Interface
> Password
> Calibration
> Additional Settings

> OK
< Close
```

4.3.1.1 Settings Overview

Settings Overview is where the most important settings associated with the device are displayed.

```
Calculation Mode: standard
four-wire unbalanced
Current Range: 1.2 A
Voltage Range: 576V
Output Contact 1: limit value 1
Output Contact 2: limit value 2
Bus Address.: 01

< Cancel
```

4.3.1.2 Input Connections

Input Connection:

The input connection, as described in Chapter 1 - "Input Connection Examples", is selected on this screen from the following choices:

- Single-phase
- Three-phase, Four-wire, Balanced
- Three-phase, Four-wire, Unbalanced
- Three-phase, Three-wire, Balanced
- Three-phase, Three-wire, Unbalanced (2 x 1)
- Three-phase, Three-wire, Unbalanced (3 x 1)

" Three-phase, Three-wire, Unbalanced " can be selected either with the connection of two current transformers (standard / Aron measuring circuit) or three current transformers.

Input Connection	
* four-wire unbalanced	
* Current Transformer:	Yes
100 A /	1 A
* Measuring Range:	1.2 A
* Voltage Transformer:	No
kV /	V
* Measuring Range $\phi - \phi$:	132 V
< OK	
< Cancel	

Current Transformer:

The user must specify whether or not current transformers are utilized in the input circuits as well as the primary and secondary ratings of the current transformers.

- Yes (Current transformers utilized/ Max Prim: 999,999 A; Max Sec: 6 A)
- No (Current transformers not utilized)

Measuring Range:

The secondary input current measuring range is selected for the SIMEAS P as follows:

- 1.2 A (rated input 1 A)
- 6 A (rated input 5 A)

Caution:

- You must make these settings for a direct connection or for a connection with current transformers.
- The selected measuring range must be greater than the secondary rating of the current transformer!
- The accuracy of SIMEAS P (see Table 3-3) is based on the selected measuring range.
- The determination of this range indicates the maximum current value that can be displayed on the device.



Note

When you change the current transformer settings, the power calculation in the device has to be reset.

Example:

CT rating: 500 / 1 A
 Measuring range 1.2 A: Maximum display range: 0 to 600A
 Measuring range 6 A: Maximum display range: 0 to 3000A

Voltage Transformer

The user must specify whether or not voltage transformers are utilized in the input circuits as well as the primary and secondary ratings of the voltage transformers.

Yes (Voltage transformers are utilized / Max Prim: 1000 kV; Max Sec: 420 V)
 No (Voltage Transformers are not utilized)

Measuring range ϕ - ϕ :

The secondary input voltage measuring range (phase-to-phase) is selected for the SIMEAS P as follows:

7KG7500

- 132 V (nominal input 100/110 V)
- 228 V (nominal input 208 V)
- 480 V (nominal input 480 V)
- 828 V (nominal input 600 V)

Table for converting phase-to-phase voltages into phase-to-neutral voltages

Selectable measuring range ϕ - ϕ	Equivalent to measuring range ϕ - N
0 to 132 V	0 to 76.2 V
0 to 228 V	0 to 132 V
0 to 480 V	0 to 276 V
0 to 828 V	0 to 480 V

7KG7550

- 132 V (nominal input 100/110 V)
- 228 V (nominal input 190 V)
- 576 V (nominal input 480 V)
- 720 V (nominal input 600 V)

Table for converting phase-to-phase voltages into phase-to-neutral voltages

Selectable measuring range ϕ - ϕ	Equivalent to measuring range ϕ - N
0 to 132 V	0 to 76.2 V
0 to 228 V	0 to 132 V
0 to 576 V	0 to 332 V
0 to 720 V	0 to 420 V

Here, the user selects the internal measuring range of the SIMEAS P.
 Up to 400V (ϕ - N) / 690V (ϕ - ϕ) can be connected directly without a voltage transformer.

Caution:

- You must make these settings for a direct connection or for a connection with current transformers.
- The selected measuring range must be greater than the secondary rating of the voltage transformer!
- The accuracy of SIMEAS P is based on the selected measuring range.
- The determination of this range indicates the maximum voltage value that can be displayed on the device.
- The frequency measurement of the SIMEAS P is initiated only when the measured voltage is > 20% of the maximum voltage of the measuring range.
- In addition, for a single-phase connection, the measuring range must be indicated as phase-to-phase voltage ϕ - ϕ . The ϕ -N measuring range must be determined according to the conversion table.

**Note**

When you change the voltage transformer settings, the power calculation in the device has to be reset.

Example:

VT Rating:	10 kV / 100 V
Measuring range 132 V:	Max display range: 0 to 13.2 kV
Measuring range 250 V:	Max display range: 0 to 25.0 kV

Recommendations:

If the connection is made to voltage transformers with secondary voltage ratings of 100, 115, or 120 V, the measuring range "132 V" should be selected.

If the connection is made directly to 230V (ϕ - N) / 400V (ϕ - ϕ), the measuring range "480 V" should be chosen.

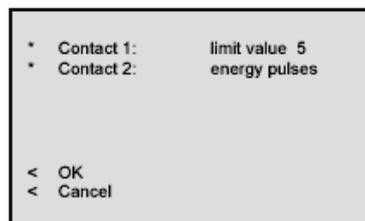
If the connection is made directly to 400V (ϕ - N) / 690V (ϕ - ϕ), the measuring range of "828 V" should be selected.

If a single-phase connection is made directly to 230 V (ϕ - N), the measuring range "480 V" (=277 V (ϕ - N)) should be chosen.

4.3.1.3 Outputs

Here, the user can determine the function of the programmable output contacts (potential-free electronic relays).

The various options for programming an output contact are discussed below.



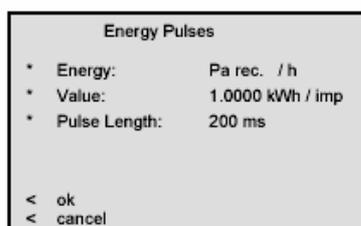
Selection:

- Off Contact has no function
- SIMEAS P is on Contact closed if power supply voltage is present.
- Energy Pulses If selected, a new window "Energy Pulses" appears.
- Limit Value 1 If selected, a new window "Limit Value 1" appears.
- Limit Value 2 If selected, a new window "Limit Value 2" appears.
- Limit Value 3 If selected, a new window "Limit Value 3" appears.
- Limit Value 4 If selected, a new window "Limit Value 4" appears.
- Limit Value 5 If selected, a new window "Limit Value 5" appears.
- Limit Value 6 If selected, a new window "Limit Value 6" appears.
- Direction of rotation This option allows you to output the rotation direction of the voltage.
 - 1: Contact activated; direction of rotation for clockwise display (phase sequence L1-L2-L3, clockwise rotation)
 - 0: Contact deactivated; direction of rotation for anti-clockwise display (2 phases interchanged, anti-clockwise rotation)

Input Window for Energy Pulses

Energy

- Selection of an energy or other metered quantity from the Measured Quantities table (depends on the type of the input connection).



Value

- Selection of the amount of energy required to generate a pulse.

Pulse length

- Can be selected from 50, 100, 150, 200.....to 500 ms.

You will find a description of the energy pulse measurement in section 6.6.2.

Input Window for Limit Value Groups

The values entered for bandwidth, pulse duration and filter time are valid for all logically selected measured quantities.

Bandwidth

- Input of 0.1 to 10 % of rated value
- Governs contact dropout.

Limit Value 5	
* Bandwidth:	1.0 %
* Pulse Length:	30 s
* Filter Time:	1.0 s
* Va < 9,8 kV or	
* Va > 10,2 kV	
<	OK
<	Cancel

Pulse Length

- 0,5s; 1s; 5s; 10s; 30s; 60s; 300s;
- ∞ (Continuous pulse for as long as a limit violation applies)

Filter Time

- Input of 0.0 to 9.9 s max. (Minimum time during which a limit violation must occur to launch a output pulse)

**Note**

To make sure that limit violations will be registered, enter a filter time ≥ 1 s.

Limit Values

- Selection of any measured quantity from the Measured Quantities table (no energy or metered quantities)
- Selection as to whether triggering should be launched when the measured quantity exceeds or drops below the threshold value (< >).
- Selection of the threshold value that initiates triggering.
- Additional measured quantities can be connected logically via "and" or "or". A maximum of six (6) measured quantities are possible.

**Note**

You can parameterize limit value groups also in **Additional Settings – Counter** (level 4, see section 4.2)!

4.3.1.4 Communication Interface

Bus Address

- Input of address 1 to 255

Baud Rate

- Selection only for connection to a PC or Modbus.
The following baudrates are allowed:
300, 600, 1200, 3400, 4800,
9600, 19200, 38400, 75600, 115200
- The baud rate of the Profibus is supported automatically up to 12 MBd with the selection being performed via the master station.

* Bus Address:	3
* Baud Rate:	9600 Bd
* Parity:	N
* Protocol:	PC – RS 485
<	OK
<	Cancel

Parity

- Only for Modbus

Protocol

- PC-RS485 (For connection to a PC via programming software)
- Profibus DP
- Modbus RTU
- Modbus ASCII

For further information, refer to the Foreword of this manual.

Note

At delivery, the following communication parameters are preset:

Address:	0
Protocol:	Serial ASCII
Baud rate:	9600
Parity:	No



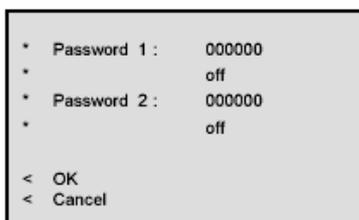
4.3.1.5 Changing the Password

Password 1:

- Off: No function
- On: Active if Password 2 is active.

Secured functions:

- Programming the Screens
- Resetting the Device
- Selecting Language / Designation



Password 2:

- Off: No function (Password 1 is also deactivated)
- On: Password activated.

Secured functions:

- Basic Settings

Notes:

- A password always consists of a 6-digit number.
- If you have forgotten the password, the device can also be activated by using the master password.
- Password 1 is only active if Password 2 is also activated.
- If both Password 1 and Password 2 are activated, Password 2 can be used to access all protected functions of Password 1.
- If an identical password is chosen for Password 1 and Password 2, all functions of Password 1 and Password 2 can be activated by means of a single password.
- In Level 1, a lock displayed on the status bar indicates whether the status of the device is password protected (lock closed) or unprotected (lock open).
- After a password has been programmed, a time of 1 minute elapses before it is activated in Level 1 (the activation can be detected when the lock closes on the status bar).
- If the protected functions are called in the menu, a window for entering the password appears.
- If a protected setting is activated by means of a password, all other settings associated with this password are activated as well. A reactivation is required after a time of 1 minute has elapsed in Level 1.

4.3.1.6 Calibration

See Chapter 7 - "Service".

4.3.1.7 Additional Settings

Counters 1 to 4

On this screen, the four counters (1 through 4) can be displayed. Limit value groups can be assigned to each counter. When a counter is selected a second window opens for the input of the corresponding limit value group (see Outputs).

```
> Counter 1 - Limit value 1
> Counter 2 - Limit value 2
> Counter 3 - Limit value 3
> Counter 4 - Limit value 4
* Calculation Mode: Standard
* Current Direction: +
* Energy Flow Direction: +
* Zero Point: 1.0000%
< OK
< Cancel
```



Note

You can parameterize limit value groups also in **Outputs – Limit value group** (level 4, see section 4.2)!

Calculation Mode

- Standard
- DIN
- Fourier

The calculation mode for some measured quantities can be changed here. For further information, see the Chapter 3 - "Measured Quantities".

Current Direction

- + (Default if connection was performed correctly pursuant to the standards)
- - (Current direction is negated)

The current direction can be changed here in lieu of making physical changes to the input connections.

Energy Flow Direction

- + positive energy flow direction = load reference (standard)
negative energy flow direction = consumer reference
(default setting; industry mode)
- - positive energy flow direction = generator
negative energy flow direction = load reference
(power generation mode)

Zero Point

The zero point suppression can be changed here. Can be selected from 0,0 ... 10,0% of the upper limit of the measurement range (Default setting: 1.0000%)



Note

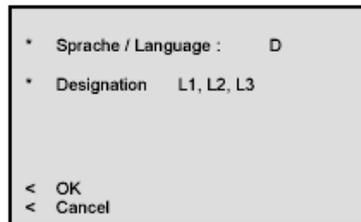
Due to its high precision, SIMEAS P can measure voltages and currents even without measuring values connected to the device. If you do not want this behaviour in your application, you can suppress measuring below a certain threshold.

4.3.2 Language / Designation

Sprache / Language

Used to select the language of the SIMEAS P as follows:

- D = German
- GB = English
- US = U. S. English



* Sprache / Language : D
* Designation L1, L2, L3
< OK
< Cancel

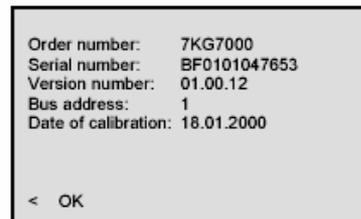
Designation

Used to select the phasing designation on the screens from the following choices:

- L1, L2, L3
- a, b, c

4.3.3 About SIMEAS

Information on the device is displayed on this window.



Order number: 7KG7000
Serial number: BF0101047653
Version number: 01.00.12
Bus address: 1
Date of calibration: 18.01.2000
< OK

4.3.4 Date / Time

Only the following functions of the SIMEAS P (standard version) utilize time information (time information is not mandatory for any function):

- Oscilloscope
- Date of adjustment (calibration)

* Date :	01. 02. 2001
* Time :	10 : 17 : 57 am
* 12 / 24h :	12
<	OK
<	Cancel

Since the standard version does not utilize battery backup, time information is reset if the power supply voltage is lost.

4.3.5 Reset

Reset

- Total reset of the SIMEAS P
- All energy and metered values
- Min – Aver – Max values
- Alarm counter (counter for limit violations)

* Total reset of SIMEAS P :	No
* Reset energy values :	No
* Reset Min–Aver–Max :	No
* Reset alarm counter :	No
<	OK
<	Cancel

4.3.6 Programming Screen

The contents and display mode of the various screens are established in this window.

Number of Screens

- Between 1 and 20

* Number of Screens :	14
* Screen Interval :	0 Sec.
* Illumination :	99 Min.
* Contrast :	5
> Screen Structure	
< OK	
< Cancel	

The number of screens that can be selected in Level 1 via the buttons   .

Screen Interval

- Between 0 and 60 seconds

0 sec. = fixed screens (only selection via buttons possible)

1...60 seconds: scrolls automatically to the next screen after 1...60 seconds

Illumination:

- Between 0 and 99 minutes

0 Min. = Illumination off

99 Min. = Illumination on permanently

Contrast:

- Between 0 and 9 (standard: 4)

4.3.6.1 Screen Structure

The contents of specific measuring screens are programmed on the "Screen Structure" window.

Screen:

Selection of a specific screen among the number previously established.

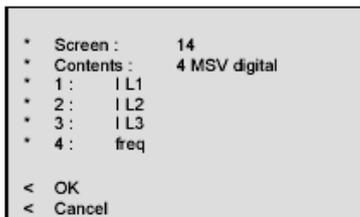
The contents of the screen are automatically displayed when switching from one screen to the next.

Contents:

The contents of the selected screen can be established or modified here as follows:

- 2 measured values digital
- 2 measured values digital / analog
- 4 measured values digital
- 4 measured values digital / analog
- Harmonics V / I
- Min – Max values
- Phasor diagram
- Oscilloscope

If a specific screen content is selected, the input fields for the corresponding characteristics are automatically displayed.



Device Programming 7KG76xx

5

5.1	Notes for the Devices 7KG76xx	68
5.2	Operating Notes	68
5.2.1	Button Functions	68
5.2.2	Window Structure.....	69
5.2.3	Notes on Parameterization	70
5.3	Overview of the Programming Levels	71
5.4	Main Menu	72
5.4.1	Screens	72
5.4.2	Settings	72
5.4.3	Date / Time.....	73
5.4.4	Log	73
5.5	Basic Settings	74
5.5.1	Output Contacts	74
5.5.2	Communications Interface	76
5.5.3	Changing the Password.....	77
5.5.4	Additional Settings	78
5.6	About SIMEAS	79
5.7	Reset	79
5.8	Programming Screen	80
5.8.1.1	Screen Structure	81
5.9	Input/Output Modules (7KG7610 and 7KG7660 only)	81
5.10	Memory Management	82
5.11	Datalogger	83
5.11.1	Datalogger Date and Time.....	83
5.11.2	Datalogger Oscilloscope	83
5.11.3	Datalogger Limit Value group	84
5.11.4	Binary States.....	85

5.1 Notes for the Devices 7KG76xx

For devices with the ordering number 7KG76xx, some parameters can only be set via the PC software SIMEAS P Parameterization (ordering number see 1.2). For these parameters, refer to chapter 6.

In addition to the standard version (refer to 4), the devices 7KG76xx offer additional screens located in a second group:

- **Standard measurement values on screens**
The Oscilloscope can be found in the Datalogger group.
- **Datalogger** (Functions from 7KG76xx)
This group offers the following screens:
 - Date and time
 - Oscilloscope
 - Limit value group
 - Binary states

5.2 Operating Notes

This chapter describes all of the setting options of the SIMEAS P that are made via the front buttons.



The Main Menu (programming level 2, see section 5.3) can be accessed

- from the Measured Values screens, the Min-Max Values screens or the Phasor Diagram screen via the ENTER button.
- from the Harmonics screen by holding down the ENTER button
- from the Oscilloscope screen via the ENTER button and the entry <Main menu.
- from the Datalogger: Use the arrow buttons to select the Date/Time screen and press the ENTER button.

5.2.1 Button Functions

The following functions are performed via the ▼ ▲ buttons:

- Moving the cursor to the entry line.
- Scrolling through selection lists when entering settings.
- Selecting numbers when entering numerical values.

If the buttons are held down, the scrolling continues automatically.

The selected line, setting, or number is confirmed by pressing the ENTER button.

5.2.2 Window Structure

Selecting * and pressing ENTER moves the cursor directly to the data entry field on the same line.

Selecting > and pressing ENTER opens a new window for additional data entry.

Selecting <"OK" and pressing ENTER confirms the settings and returns the user to the previous level.

Selecting <"Cancel" and pressing ENTER cancels the setting changes just made and returns the user to the previous level.

The screenshot shows a menu window with the following content:

Number of Screens :	14
* Repeat Ratio :	0 Sec.
* Illumination :	99 Min.
* Contrast :	5
> Screen Construction	
< OK	
< Cancel	

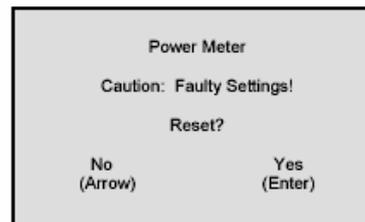
Four arrows point from the text on the left to the menu items: the first arrow points to the asterisk on the 'Repeat Ratio' line, the second to the right arrow on the 'Screen Construction' line, the third to the left arrow on the 'OK' line, and the fourth to the left arrow on the 'Cancel' line.

5.2.3 Notes on Parameterization

- The selection of the measured quantity depends on the selected input voltage and current connections.
- If the number selected is too large, "Overflow" is displayed and the input value is automatically set to the maximum value.
- If the power supply voltage is switched off during programming, the message illustrated below appears when the device is restarted. Therefore, the power supply voltage should only be switched off in level 1 (measuring screens).

Select "No" via the ▼ ▲ buttons to retain the settings as they existed prior to the loss of power supply voltage.

Choose "Yes" by pressing the ENTER button to restore the default settings.



Note

This means, that you should always leave the parameter screens completely (OK or Cancel) until the measurement screens are displayed again. This ensures that all parameters will be accepted by the device.



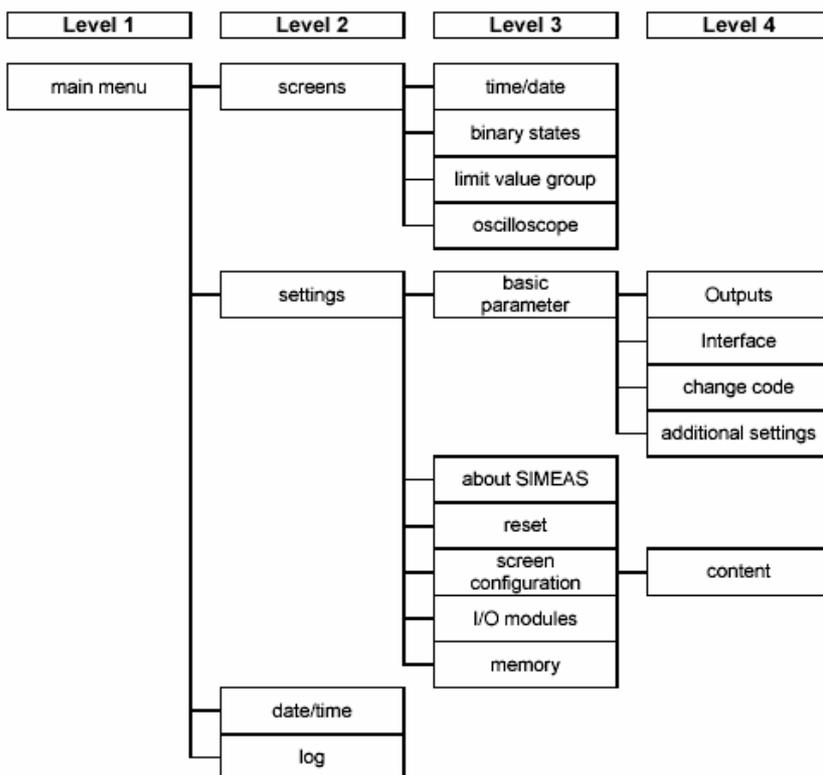
Note

Please check the parameters and the adjustment data afterwards, to ensure the correct function of the SIMEAS P.

If you have adjusted the device manually (refer to section 7.1), the adjustment data will not be overwritten by default settings.

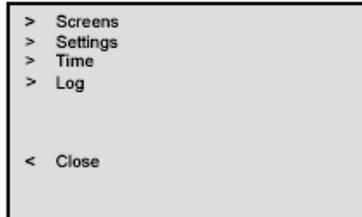
5.3 Overview of the Programming Levels

- Level 1 corresponds to the measurement screens
- Levels 2 through 4 correspond to the programming screens and are described as follows:



5.4 Main Menu

The main menu is used to access various submenus.



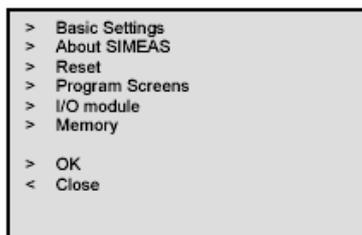
5.4.1 Screens

Via Screens you can access the following displays:

- Main menu
- Measured value screens
- Datalogger

5.4.2 Settings

The "Basic settings" submenu is used to access various input screens for device programming



5.4.3 Date / Time

Only the following functions of the SIMEAS P (basic version) utilize time information (time information is not mandatory for any function):

- Oscilloscope
- Date of adjustment (calibration)
- Measured value memory

* Date :	01. 02. 2001
* Time :	10 : 17 : 57 am
* 12 / 24h :	12
Summer time:	31.03. to 27.10.
Binary input:	BI1
<	OK
<	Cancel

One binary input (optional 7KG7610/7KG7660) may be used for time synchronization via minute impulse.

The data for summer/winter time and the binary input can only be set via the PC software SIMEAS P Parameterization (refer to section 6).

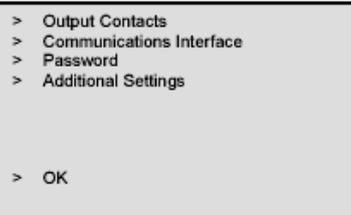
5.4.4 Log

The screen "Log" displays date and time of the most recent status changes.

Reset	10.10.02	12:23:40
Power on	10.10.02	12:25:20
Settings	19.09.02	16:20:55
Res. Limit	09.10.02	10:12:05
Res. Mean	22.10.01	09:22:10
Res. Power	24.10.01	17:13:44
Res. Osci.	12.06.01	08:56:15
Clock	10.10.02	12:00:00
Res. Binary	10.10.02	12:35:17

5.5 Basic Settings

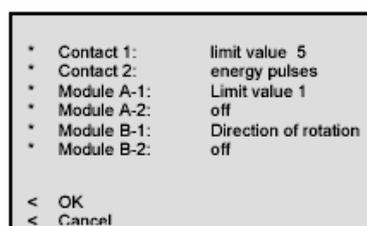
The "Basic settings" submenu is used to access various input screens for device programming



5.5.1 Output Contacts

Here, the user can determine the function of the programmable output contacts (potential-free electronic relays).

The various options for programming an output contact are discussed below.



Selection:

- Off Contact has no function
- SIMEAS P is on Contact closed if power supply voltage is present.
- Energy Pulses If selected, a new window "Energy Pulses" appears.
- Limit Value 1 If selected, a new window "Limit Value 1" appears.
- Limit Value 2 If selected, a new window "Limit Value 2" appears.
- Limit Value 3 If selected, a new window "Limit Value 3" appears.
- Limit Value 4 If selected, a new window "Limit Value 4" appears.
- Limit Value 5 If selected, a new window "Limit Value 5" appears.
- Limit Value 6 If selected, a new window "Limit Value 6" appears.
- Direction of rotation This option allows you to output the rotation direction of the voltage.
 - 1: Contact activated; direction of rotation for clockwise display (phase sequence L1-L2-L3, clockwise rotation)
 - 0: Contact deactivated; direction of rotation for anti-clockwise display (2 phases interchanged, anti-clockwise rotation)

Input Window for Energy Pulses**Energy**

- Selection of an energy or other metered quantity from the Measured Quantities table (depends on the type of the input connection).

Energy Pulses	
* Energy:	Pa rec. / h
* Value:	1.0000 kWh / imp
* Pulse Length:	200 ms
<	ok
<	cancel

Value

- Selection of the amount of energy required to generate a pulse.

Pulse length

- Can be selected from 50, 100, 150, 200.....to 500 ms.

You will find a description of the energy pulse measurement in section 6.6.2.

Input Window for Limit Value

The values entered for bandwidth, pulse duration and filter time are valid for all logically connected measured quantities.

Limit Value 5	
* Bandwidth:	1.0 %
* Pulse Length:	30 s
* Filter Time:	1.0 s
* Va <	9,8 kV or
* Va >	10,2 kV
<	OK
<	Cancel

Bandwidth

- Input of 0.1 to 10 % of rated value
- Governs contact dropout.

Pulse Length

- 0,5s; 1s; 5s; 10s; 30s; 60s; 300s;
- ∞ (triggering for as long as a limit violation applies)

Filter Time

- Input of 0.0 to 9.9s max. (Minimum time during which a limit violation must occur to launch a triggering)

**Note**

To make sure that limit violations will be registered, enter a filter time ≥ 1 s.

Limit Values

- Selection of any measured quantity from the Measured Quantities table (no energy or metered quantities)
- Selection as to whether triggering should be launched when the measured quantity exceeds or drops below the threshold value (< >).
- Selection of the threshold value that initiates triggering.
- Additional measured quantities can be connected logically via "and" or "or". A maximum of six (6) measured quantities are possible.

**Note**

You can parameterize limit value groups also in **Additional Settings – Counter** (level 4, see section 5.3) and in the Oscilloscope menu!

5.5.2 Communications Interface

Bus Address

- Input of address 1 to 255

Baud Rate

- Selection only for connection to a PC or Modbus.
The following baudrates are allowed:
300, 600, 1200, 3400, 4800,
9600, 19200, 38400, 75600, 115200
- The baud rate of the Profibus is supported automatically up to 12 MBd with the selection being performed via the master station.

* Bus Address:	3
* Baud Rate:	9600 Bd
* Parity:	N
* Protocol:	PC – RS 485
<	OK
<	Cancel

Parity

- Only for Modbus

Protocol

- PC-RS485 (For connection to a PC via programming software)
- Profibus DP
- Modbus RTU
- Modbus ASCII

For further information, refer to the Foreword of this manual.

Note

At delivery, the following communication parameters are preset:

Address: 0
 Protocol: Serial ASCII
 Baud rate: 9600
 Parity: No



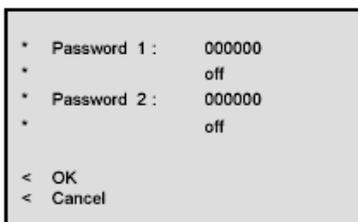
5.5.3 Changing the Password

Password 1:

- Off: No function
- On: Active if Password 2 is active.

Secured functions:

- Programming the Screens
- Resetting the Device
- Selecting Language / Designation



Password 2:

- Off: No function (Password 1 is also deactivated)
- On: Password activated.

Secured functions:

- Basic Settings

Notes:

- A password always consists of a 6-digit number.
- If you have forgotten the password, the device can also be activated by using the master password. Please contact our hotline for the master password.
- Password 1 is only active if Password 2 is also activated.
- If both Password 1 and Password 2 are activated, Password 2 can be used to access all protected functions of Password 1.
- If an identical password is chosen for Password 1 and Password 2, all functions of Password 1 and Password 2 can be activated by means of a single password.
- In Level 1, a lock displayed on the status bar indicates whether the status of the device is password protected (lock closed) or unprotected (lock open).
- After a password has been programmed, a time of 1 minute elapses before it is activated in Level 1 (the activation can be detected when the lock closes on the status bar).
- If the protected functions are called in the menu, a window for entering the password appears.
- If a protected setting is activated by means of a password, all other settings associated with this password are activated as well. A reactivation is required after a time of 1 minute has elapsed in Level 1.

5.5.4 Additional Settings

Counters 1 to 4

On this screen, the four counters (1 through 4) can be displayed digitally and limit values can be assigned to each counter. When a counter is selected, a second window opens for the input of the corresponding values (see Output Contacts).

```
> Counter 1 - Limit value 1
> Counter 2 - Limit value 2
> Counter 3 - Limit value 3
> Counter 4 - Limit value 4
* Calculation Mode: Standard
* Current Direction: +
* Energy Flow Direction: +
* Zero Point: 1.0000%
< OK
< Cancel
```

Calculation Mode

- Standard
- DIN
- Fourier

The calculation mode for some measured quantities can be changed here. For further information, see the Chapter 3 - "Measured Quantities".

Current Direction

- + (Default if connection was performed correctly pursuant to the standards)
- - (Current direction is negated)

The current direction can be changed here in lieu of making physical changes to the input connections.

Energy Flow Direction

- + positive energy flow direction = load reference
negative energy flow direction = consumer reference
(default setting; industry mode)
- - positive energy flow direction = generator reference
negative energy flow direction = load reference
(power generation mode)

Zero Point

The zero point suppression can be changed here.

Can be selected from 0,0 ... 10,0% of the upper limit of the measurement range (Default setting: 1%)

Note



Due to its high precision, SIMEAS P can measure voltages and currents even without measuring values connected to the device. If you do not want this behaviour in your application, you can suppress measuring below a certain threshold.

5.6 About SIMEAS

All of the device characteristics are displayed on this window.

```
Order number: 7KG7000-8AA
Serial number: BF0101047653
Version number: 01.00.12
Bus address: 1
Date of calibration: 18.01.2000
Modules: BBCC
```

< OK

For the devices 7KG7610 and 7KG7660 the line **Modules** displays the optional I/O modules (ordering code) in the slots A, B, C, and D.

For devices without I/O modules the line **Modules** displays **AAAA** (= no modules).

5.7 Reset

Reset

- Total reset of the SIMEAS P
- All energy and metered values
- Min – Aver – Max values
- Alarm counter (counter for limit violations)
- Power values (records in the memory)
- Mean values (records in the memory)
- Alarmlog (memory for the states of the limit value groups)
- Binary (memory for the binary states)

```
> Total reset of SIMEAS P: No
> Reset energy values : No
> Reset Min-Aver-Max : No
> Reset alarm counter : No
> Reset power values : No
> Reset mean values : No
> Reset Alarmlog : No
> Reset Binary : No
```

< OK
< Cancel

For reset power values, mean values, alarmlog and binary the recordings will be deleted from the memory and started again.

5.8 Programming Screen

The contents and display mode of the various screens are established in this window.

Number of Screens

- Between 1 and 20

The number of screens that can be selected in Level 1 via the buttons   .

* Number of Screens :	14
* Screen Interval :	0 Sec.
* Illumination :	99 Min.
* Contrast :	5
> Screen Structure	
< OK < Cancel	

Screen Interval

- Between 0 and 60 seconds

0 sec. = fixed screens (only selection via buttons possible)

1...60 seconds: scrolls automatically to the next screen after 1...60 seconds

Illumination:

- Between 0 and 99 minutes

0 Min. = Illumination off

99 Min. = Illumination on permanently

Contrast:

- Between 0 and 9

5.8.1.1 Screen Structure

The contents of specific measuring screens are programmed on the "Screen Structure" window.

Screen:

Selection of a specific screen among the number previously established.

* Screen :	14
* Contents :	4 MSV digital
* 1 :	I L1
* 2 :	I L2
* 3 :	I L3
* 4 :	freq
<	OK
<	Cancel

The contents of the screen are automatically displayed when switching from one screen to the next.

Contents:

The contents of the selected screen can be established or modified here as follows:

- 2 measured values analog
- 2 measured values digital
- Phasor diagram
- Min – Max values
- Harmonics V / I
- 4 measured values analog
- 4 measured values digital

If a specific screen content is selected, the input fields for the corresponding characteristics are automatically displayed.

5.9 Input/Output Modules (7KG7610 and 7KG7660 only)

I/O modules		
No.	Module	State
A	Relays outputs	A1 = 1 A2 = 0 A3 = 0
B	Analog inputs	E1 = 0.20 mA E2 = 0.02 mA
C	Analog outputs	A1 = 0.00 mA A2 = 0.00 mA
D		

< OK

This screen displays the optional I/O modules (7KG7610 and 7KG7660 only) together with their current state.
For devices without I/O modules the table remains empty.

5.10 Memory Management

Memory Management		
> Mean Values:	5%	533.3 d
> Power recording:	34%	1.1 d
> Osziloscope:	15%	5.4 d
> Limit values:	38%	49664
> Binary states:	8%	10240
<	OK	
<	Cancel	

In this screen you can determine how the available memory capacity (1 MByte) will be allocated to the available functions. The indicated percentages must be in the range between 1 and 96 percent and total 100%. Once you have entered a percent value, SIMEAS PAR displays to its right the recording time and the number of values that will be stored for this setting.

You have only to enter the percentual values; the recording time will be calculated automatically. For limit values and binary states the maximum number of entries will be displayed.

Notes:

- For power recording, the recording time will be calculated from the number of channels to be recorded and the period time.
- For mean values and power recording, you have to use the PC software SIMEAS P Parameterization (ordering number see section 1.2).

5.11 Datalogger

The group "Datalogger" displays the following screens:

- Date and time
- Oscilloscope
- Limit value group
- Binary states

To work with the group "Datalogger" proceed as follows:

- In the "Main menu", select "Screens" and press two times ENTER.
- Use the buttons   to access the group "Datalogger".
- To leave the "Datalogger", go back to the screen "Date and time" and press ENTER to return to the "Main menu".

5.11.1 Datalogger Date and Time

This screen the current time of the SIMEAS P. To set the values, refer to 5.4.3.



5.11.2 Datalogger Oscilloscope

The oscilloscope is equivalent to the device 7KG7500/7KG7550 (described in section 2.2.9).
For the devices 7KG76xx, the memory capacity can be allocated to the available functions (refer to section 5.10).

5.11.3 Datalogger Limit Value group

Limit	Time	↑↓	Reason	
4	13.11.02 23:20:10	↑↓		Line 7
ULN2	13.11.02 22:40:12		210,2 V	Line 6
ULN3	13.11.02 22:40:07		210,2 V	Line 5
ULN3	13.11.02 22:40:02	↓		Line 4
ULN2	13.11.02 22:40:01	↓		Line 3
ULN1	12.11.02 08:22:41		235,8 V	Line 2
ULN1	12.11.02 08:22:40	↑		Zeile 1

This screen displays all limit violations ordered by time. You have to read the lines from bottom to top.

Meaning of the display:

Line 1:	ULN1	08:22:40	Limit violation
Line 2:	ULN1	08:22:41	Return to normal area; Highest measured value: 235.8 V Duration: 1 s
Line 3:	ULN2	22:40:01	Below limit
Line 4:	ULN3	22:40:02	Below limit
Line 5:	ULN3	22:40:07	Return to normal area; Lowest measured value: 210.2 V Duration: 5 s
Line 6:	ULN2	22:40:12	Return to normal area; Lowest measured value: 210.2 V Duration: 11 s
Line 7:	4	23:20:10	Limit violation in limit value group 4. Since limit value groups can be combined, only a general limit violation is displayed.

Notes:

- Press ENTER to activate the arrow buttons Up/Down to display all messages.
- Press ENTER again to deactivate this mode. This allows you to switch to the other screens via the arrow buttons Up/Down.
- Go back to the screen "Date/Time" and press ENTER to return to the main menu.

5.11.4 Binary States

Binary	Date	Time	State
In C-1	20.01.04	10:20:17	off
In C-1	20.01.04	10:20:10	on
Out A-1	20.01.04	10:20:08	off
Out A-1	20.01.04	10:19:59	on

This screen displays all changes of the binary states ordered by time. You have to read the lines from bottom to top.

Notes:

- Press ENTER to activate the arrow buttons Up/Down to display all messages.
- Press ENTER again to deactivate this mode. This allows you to switch to the other screens via the arrow buttons Up/Down.
- Go back to the screen "Date/Time" and press ENTER to return to the main menu.