

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE AHORRO DE ENERGÍA EN CLIMATIZACIÓN**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rodolfo Berrios.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Uxmal Amézquita.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
De Ingeniero Mecánico  
Por la Br. Alzolar A. Lisbeth F.

Caracas, Mayo 2003

*A Dios,  
Por darme la vida y permitirme aprender de cada una de  
las experiencias que ella me ofrece.*

*A mis padres,  
Por enseñarme el verdadero valor de la vida, por  
guiarme con su sabiduría hacia el camino de la felicidad*

*A mi madre, por brindarme todo su amor y su infinita  
comprensión en mis momentos más difíciles.*

*A mi padre, por el apoyo y la credibilidad que siempre  
ha depositado en mí.*

*A mis hermanas y a sus dos pequeñines,  
Por haberme permitido compartir con ellas sus propias  
experiencias, lo cual contribuyó en mi formación como  
ser humano.*

*A Yelitze, por ser mi ejemplo de rectitud y valentía.*

*A Lennys, por mostrarme el lado más humano de las  
cosas, por darme tranquilidad, invitándome siempre a  
reflexionar.*

*A mis abuelos,  
que aunque no se encuentran todos a mi lado,  
contribuyeron en mi formación moral y espiritual.*

*A Cristian,  
por brindarme su apoyo desde el inicio de mi carrera, en  
los momentos de alegría y en los más difíciles,  
ayudándome con amor y paciencia, a encontrar siempre  
la mejor solución a las cosas; por enseñarme a  
perseverar.*

*A todas aquellas personas que han contribuido y se han  
interesado en mi crecimiento personal, para hacer de mí  
un a mejor persona.*

*Lisbeth*

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas quienes directa o indirectamente contribuyeron en la elaboración de este trabajo.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, que me transmitieron sus enseñanzas y experiencias para guiarme hacia el camino del aprendizaje, y en especial, al Prof. Lecue, por su valioso aporte a este trabajo y la disposición prestada a lo largo del desarrollo del mismo; al Prof. Grullón y Prof. Rodolfo Berrios, por la colaboración prestada en su rol de tutor académico.

A la C. A. Metro de Caracas y a todo el personal de la Gerencia de Investigación y Desarrollo, en especial, al Ing. Uxmal Amézquita, por ser más que un excelente tutor industrial, por enseñarme a trabajar con amor y disciplina, transmitiéndome inestimables experiencias de gran aporte a mi crecimiento personal e integral. A la Sra. Omaira Bello, por el apoyo prestado a lo largo del desarrollo de este trabajo. A los Ing. Ramón Muñoz y José Peña, por la consideración mostrada hacia mi persona. A los Ingenieros Norbeth Figuera, Carlos Yuabe y Leonardo Saldivia de la División de Proyectos Electromecánicos, por facilitarme el trabajo en esta empresa con sus colaboraciones. A Douglas Aponte y Aref Alvarenga, por la ayuda prestada de manera inmediata y desinteresada.

Al Ing. Fernando Farías, de la empresa Greenheck, por su atención y disposición en numerosas ocasiones. A los Ing. Antonio Crespo de empresas York Internacional, Ing. Alexander Ocupati de TRANE Air Conditioning, Paolo Cappione de RJG, Enrique Pérez del Ministerio de Energía y Minas y Sr. Guillermo Capriles de la Cámara Venezolana de la Industria Eléctrica, por su valiosa colaboración, que permitió la culminación de este proyecto.

A Cristian Díaz, por su inmensa ayuda a lo largo de toda mi carrera, por permanecer a mi lado, brindándome todo su apoyo, y más aún, en la elaboración de este libro, en todas y cada una de sus etapas.

A mi amigo Hendryk Albornoz, por la gran colaboración prestada en esta última etapa de mi carrera.

A mis padres, por su gran apoyo incondicional sobre todo en el desarrollo de este trabajo, por estar atentos y prestos a brindarme su ayuda en todo momento.

A mis hermanas, por el apoyo y la confianza que siempre me han brindado, así como las críticas y correcciones realizadas a este trabajo, que me permitieron mejorar su calidad.  
A Dios, por permitirme finalizar este trabajo exitosamente.  
A todos,

Gracias!!!

**Alzolar A. Lisbeth F.**

# **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE AHORRO DE ENERGÍA EN CLIMATIZACIÓN**

**Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios. Tutor Industrial:**  
**Ing. Uxmal Amézquita. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2003, 141 p.**

**Palabras Claves:** ahorro energético, rueda entálpica, convertidor de frecuencia, truncador de potencia, sensor de CO<sub>2</sub>.

**Resumen:** El objetivo de este estudio es determinar un equipo de tecnología avanzada que permita disminuir el consumo eléctrico para los sistemas de acondicionamiento de aire en una edificación piloto de la C.A. Metro de Caracas, enmarcado en el Plan Maestro de Racionalización de Energía Eléctrica. Para ello se realizó una revisión de los equipos de ahorro que se encuentran actualmente en el mercado y se estudiaron sus características técnicas, funcionamiento, capacidad de ahorro, criterios de selección, tiempo de recuperación de inversión, y costos, con el fin de realizar un análisis técnico-económico que permita determinar el equipo más adecuado a las características del sistema de climatización existente, teniendo como base los registros de consumo de UMA's, bombas y chillers. Aplicando un método de toma de decisiones normado por la IEEE y ASME, denominado *Método de Decisión Múltiple Binaria*, se evaluaron los parámetros de selección, y se obtuvo como resultado, entre los equipos estudiados, la aplicación de truncadores de potencia inteligentes, lo cual produce una disminución en el consumo de energía eléctrica de los sistemas de aire acondicionado del edificio de 3% aproximadamente, además de mejorar la eficiencia de los mismos.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN	2
I. PROBLEMÁTICA DE DÉFICIT DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN VENEZUELA	3
1.1 El Sector Eléctrico Nacional.	3
1.2 Datos de Generación y Potencia del SEN.	5
1.3 Problemática Energética de las Centrales de Generación Térmica e Hidráulica de Venezuela.	6
1.4 Medidas Gubernamentales ante la Problemática del Sector Eléctrico.	8
1.5 Consumo de Energía Eléctrica en la C.A. Metro de Caracas.	10
II. EQUIPOS DE AHORRO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN	14
2.1 Sistemas de Climatización	14
2.2 Equipos de Ahorro de Energía en Sistemas de Climatización	17
2.2.1 Ruedas Entálpicas.	18
2.2.1.1 Descripción de las Ruedas Entálpicas.	19
2.2.1.2 Funcionamiento de las Ruedas Entálpicas.	21

2.2.1.3 Ubicación de las Ruedas Entálpicas en los Sistemas de Climatización	26
2.2.1.4 Mantenimiento Requerido por las Ruedas Entálpicas	27
2.2.1.5 Ventajas de Uso de Ruedas Entálpicas.	28
2.2.1.6 Desventajas de Uso de Ruedas Entálpicas.	29
2.2.1.7 Criterios de Selección.	29
2.2.1.8 Ejemplos de Ahorro de Energía utilizando Ruedas Entálpicas	29
2.2.2 La Rueda Disecante.	32
2.2.2.1 Descripción de la Rueda Disecante.	32
2.2.2.2 Funcionamiento de la Rueda Disecante.	34
2.2.2.3 Ubicación de las Ruedas Disecantes al aplicarlas como Equipos de Ahorro de Energía.	37
2.2.2.4 Mantenimiento de las Ruedas Disecantes.	38
2.2.2.5 Ventajas del Uso de Ruedas Disecantes.	38
2.2.2.6 Desventajas del Uso de Ruedas Disecantes.	38
2.2.2.7 Criterios de Selección de Ruedas Disecantes.	38
2.2.3 Truncadores de Potencia Inteligentes.	39
2.2.3.1 Descripción de los Truncadores de Potencia Inteligentes.	39
2.2.3.2 Funcionamiento de los Truncadores de Potencia Inteligentes.	40
2.2.3.3 Ubicación de los Truncadores de Potencia Inteligentes al ser utilizados con Motores.	42
2.2.3.4 Mantenimiento.	43
2.2.3.5 Ventajas.	43

2.2.3.6 Desventajas.	44
2.2.3.7 Criterios de Selección.	44
2.2.4 Convertidor de Frecuencia.	45
2.2.4.1 Descripción de los Convertidores de Frecuencia.	46
2.2.4.2 Funcionamiento del Convertidor de Frecuencia.	48
2.2.4.3 Ubicación de los Convertidores de Frecuencia en sistemas de Aire Acondicionado.	51
2.2.4.4 Mantenimiento de los Convertidores de Frecuencia.	52
2.2.4.5 Ventajas.	52
2.2.4.6 Desventajas.	53
2.2.4.7 Criterios de Selección.	53
2.2.4.8 Ejemplo de Funcionamiento de Sistemas de Aire Acondicionado con Convertidor de Frecuencia.	56
2.2.5 Sensores de CO <sub>2</sub> .	61
2.2.5.1 Descripción de los Sensores de CO <sub>2</sub> .	62
2.2.5.2 Funcionamiento de los Sensores de CO <sub>2</sub> .	63
2.2.5.3 Mantenimiento de los Sensores de CO <sub>2</sub> .	64
2.2.5.4 Ventajas del Uso de los Sensores de CO <sub>2</sub> .	64
2.2.5.5 Desventajas del Uso de Sensores de CO <sub>2</sub> .	64
2.2.5.6 Criterios de Selección de los Sensores de CO <sub>2</sub> .	65
III. EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA DEPENDENCIA DE LA C.A. METRO DE CARACAS.	66
3.1 Síntesis del Sistema de Energía Eléctrica del Edificio Anexo la Hoyada.	66

3.2 Resultados de la Auditoría Energética Aplicada al Edificio Anexo la Hoyada.	68
3.3. Descripción del Sistema de Aire Acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada	70
3.3.1 Características del Generador de Agua Helada o Chiller (GAH).	70
3.3.2 Características de las Bombas de Agua Helada (BAH).	72
3.3.3 Características de las Unidades de Manejo de Aire (UMAs).	74
<b>IV. AHORRO TEÓRICO Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN EN LA INCORPORACIÓN DE LOS EQUIPOS DE AHORRO DE ENERGÍA.</b>	<b>77</b>
4.1. Análisis de la incorporación de Ruedas Entálpicas en el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.	78
4.1.1. Selección de las Ruedas entálpicas para el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.	78
4.1.2. Ahorro Teórico y Tiempo de Recuperación de Inversión de las Ruedas Entálpicas.	80
4.2. Análisis de la incorporación de Truncadores de Potencia Inteligentes en el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.	81
4.2.1. Selección de Truncadores de Potencia Inteligentes para el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.	81
4.2.2. Ahorro Teórico y Tiempo de Recuperación de Inversión de los Truncadores de Potencia Inteligentes.	82
4.3. Análisis de la incorporación de Convertidores de Frecuencia en el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.	83
4.3.1. Selección de Convertidores de Frecuencia para el Sistema de	83

Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.

4.3.2. Ahorro Teórico y Tiempo de Recuperación de Inversión de los Convertidores de Frecuencia.	84
V. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE AHORRO DE ENERGÍA.	88
VI. CONCLUSIONES	94
VII. RECOMENDACIONES	97
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
IX. ABREVIATURAS Y UNIDADES	102
X. GLOSARIO	104
XI. APÉNDICES	108
XII. ANEXOS	138

## **LISTA DE FIGURAS**

	Pág.
Figura 1.1. Aporte de los Sectores de Generación Eléctrica 2001.	5
Figura 1.2. Consumo de Energía Eléctrica de la C.A. Metro de Caracas.	11
Figura 1.3. Consumo de Energía Eléctrica del Sistema de Grupos Auxiliares.	11
Figura 2.1. Leyes de Proporcionalidad de Bombas y Ventiladores.	17
Figura 2.2. Rueda Entálpica.	19
Figura 2.3. Capacidad de Absorción de distintos disecantes.	20
Figura 2.4. Proceso de Recuperación de Energía en la Rueda Entálpica.	22
Figura 2.5. Recuperación de Energía de las Corrientes de Aire en una Rueda Entálpica.	23
Figura 2.6. Proporciones de la Mezcla de Aire en la Rueda Entálpica.	24
Figura 2.7. Proceso Psicrométrico de la Mezcla de Aire en la Rueda Entálpica	24
Figura 2.8. Rueda Entálpica con Equipos Compactos.	26
Figura 2.9. Rueda Entálpica con Unidades de Manejo de Aire	27
Figura 2.10. Rueda Entálpica.	28
Figura 2.11. Ejemplo1. Uso de Ruedas Entálpicas en Sistemas de Aire Acondicionado.	30
Figura 2.12. Ejemplo2. Uso de Ruedas Entálpicas con Aumento de Volumen de Aire Fresco.	31
Figura 2.13. Componentes de la Rueda Disecante.	33
Figura 2.14. Sectores de la Rueda Disecante.	34
Figura 2.15. Variación de las Condiciones del Aire en la Rueda Disecante.	35

Figura 2.16. Comportamiento del Material Disecante Durante el Proceso de Deshumidificación.	36
Figura 2.17. Ubicación de la Rueda Disecante en un Sistema de Aire Acondicionado.	37
Figura 2.18. Tensión Aplicada al Motor.	41
Figura 2.19. Curva Torque vs. Velocidad de un Motor de Inducción.	41
Figura 2.20. Curva Corriente vs. Velocidad en un Motor de Inducción.	42
Figura 2.21. Convertidor de Frecuencia (serie Altivar)	46
Figura 2.22. Elementos de un Convertidor de Frecuencia.	47
Figura 2.23. Convertidor de Frecuencia serie Altivar Telemecanique.	48
Figura 2.24. Relación Tensión/Frecuencia (V/Hz) suministrado por un Convertidor de Frecuencia.	49
Figura 2.25. Par del Motor bajo el Efecto de Variación de Frecuencia.	50
Figura 2.26. Convertidores de Frecuencia en un Sistema de Aire Acondicionado.	52
Figura 2.27. Carga Característica de un Motor Asíncrono.	54
Figura 2.28. Curvas Características de la Bomba	58
Figura 2.29. Relación entre Caudal y Tiempo de Operación de la Bomba.	59
Figura 2.30. Ejemplo de un Sistema de Aire Acondicionado con Convertidor de Frecuencia	60
Figura 2.31. Sensor de CO <sub>2</sub>	62
Figura 2.32. Componentes de un Sensor de CO <sub>2</sub>	63
Figura 3.1. Tableros de Distribución Eléctrica del Edificio Anexo la Hoyada.	67
Figura 3.2. Consumo Total de Energía Eléctrica del Edificio Anexo la Hoyada	69
Figura 3.3. Consumo de Energía de los Equipos del Sistema de Aire	69

Acondicionado del Edificio Anexo operando las 24 horas.	
Figura 3.4. Chiller Centrífugo Enfriado por Aire, marca Trane.	70
Figura 3.5. Demanda del Chiller del Edificio Anexo la Hoyada	71
Figura 3.6. Demanda de la Bomba.	73
Figura 3.7. UMA <sub>s</sub> del Edificio Anexo la Hoyada.	74
Figura 3.8. Demanda de la UMA 2 del Edificio Anexo la Hoyada	75

## **LISTA DE TABLAS**

	Pág.
Tabla 1.1. Empresas del Sector Eléctrico Nacional.	3
Tabla 1.2. Datos Característicos de Generación Eléctrica 1998 – 2001.	6
Tabla 1.3. Niveles de Operación de la Represa de Guri.	6
Tabla 2.1. Condiciones de Diseño de Sistema de Aire Acondicionado.	29
Tabla 2.2. Ejemplo 1, Datos Característicos.	57
Tabla 3.1. Características de los Generadores de Agua Helada (chillers del Edificio Anexo la Hoyada.	71
Tabla 3.2. Consumo de Energía Promedio del Chiller 1 del Edificio Anexo la Hoyada, durante 24 horas.	72
Tabla 3.3. Características de las bombas del Edificio Anexo la Hoyada.	72
Tabla 3.4. Consumo de Energía de la Bomba de Agua Helada (BAH – 1) durante 24 horas.	73
Tabla 3.5. Tabla de Características Técnicas de las UMAs del Edificio Anexo la Hoyada.	75
Tabla 3.6. Consumo Total de Energía de las UMAs del Edificio Anexo la Hoyada.	76
Tabla 4.1. Condiciones de Diseño del Sistema de Aire Acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada.	79
Tabla 4.2. Características de la Rueda Entálpica para la Aplicación al edificio Anexo la Hoyada.	79
Tabla 4.3. Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión de la rueda Entálpica en el Sistema de Aire acondicionado en Estudio	80

Tabla 4.4. Truncadores de Potencia Inteligentes para la Bomba de Agua Helada y Ventiladores de UMAs, del Edificio Anexo la Hoyada.	81
Tabla 4.5. Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión del Truncador de Potencia Inteligente, aplicado a los Ventiladores de las UMAs del Edificio Anexo la Hoyada	82
Tabla 4.6. Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión del Truncador de Potencia Inteligente, aplicado a la Bomba de Agua Helada del Edificio Anexo la Hoyada	83
Tabla 4.7. Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión de los Variadores de Frecuencia, aplicados a los Ventiladores de las UMAs del Edificio Anexo la Hoyada	85
Tabla 4.8. Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión del Variador de Frecuencia , aplicado a la Bomba de Agua Helada del Edificio Anexo la Hoyada	86
Tabla 4.9. Resumen Comparativo de la Incorporación de los distintos Equipos de Ahorro de Energía en el Edificio Anexo la Hoyada.	87
Tabla 5.1. Matrices del Grupo Económico.	90
Tabla 5.2. Matrices del Grupo de Servicios	91
Tabla 5.3. Matrices del Grupo Técnico	92
Tabla 5.4. Matriz de Selección Final.	93

## INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica en Venezuela presenta actualmente algunos problemas que podrían desencadenar en una crisis energética de corto a mediano plazo debido a factores como:

- La fuerte sequía del período correspondiente a los últimos años, que ha conllevado a la merma significativa de la generación en las centrales hidroeléctricas Guri, principalmente y Macagua.
- Las plantas termoeléctricas que pudiesen eventualmente salir de operación por sobrepasar la vida útil de las mismas.
- El crecimiento anual de demanda y consumo de energía eléctrica presenta una tendencia de crecimiento.

Lo anteriormente expuesto, provocó un estado de alerta en el Sector Eléctrico Nacional, que motivó al Ejecutivo Nacional a través del Ministerio de Energía y Minas, a generar una serie de acciones tendentes a disminuir el consumo de la energía eléctrica, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- El decreto 37377, el cual indica la orden de ejecución de un programa de ahorro de energía en dependencias públicas.
- Cursos de capacitación y charlas a funcionarios de enlace y demás entes relacionados con el programa de ahorro de energía.
- Etc.

La C. A. Metro de Caracas a la par de todo lo que acontecía en el país en materia energética, desarrollaba el Plan Maestro de Racionalización y Optimización de la Energía Eléctrica de sus instalaciones debido, en primer lugar, al gran peso que tiene

## INTRODUCCIÓN

---

ésta dentro de la estructura financiera de la empresa, y en segundo orden para dar cumplimiento al decreto presidencial mencionado anteriormente.

El Plan Maestro desarrollado por la C. A. Metro de Caracas, contempla entre una de sus fases, el desarrollar estudios que ofrezcan alternativas para la disminución del consumo de energía eléctrica, sin afectar el confort y la seguridad de trabajadores y usuarios en sus instalaciones; es aquí donde tiene lugar este proyecto , el cual trata sobre un estudio técnico y económico para determinar la factibilidad de incorporar un equipo de ahorro de energía en los sistema de climatización de edificaciones, partiendo de la utilización de nuevas tecnologías que permitan optimizar al sistema existente.

Este proyecto se desglosa en cinco capítulos, los cuales tratan lo siguiente:

En el capítulo I se describe la problemática de generación de energía eléctrica existente en el país, los factores que la han determinado y las acciones que ha tomado el Estado para solventarlo. Así mismo, se presenta la situación de la C.A Metro de Caracas frente a la necesidad de ahorro de energía.

El capítulo II se describen los diferentes equipos existentes en el mercado, en materia de ahorro de energía en climatización, además, se estudia su funcionamiento, criterios de selección, capacidad de ahorro, etc.

En el capítulo III, se presentan las características del sistema de acondicionamiento de aire del edificio piloto de la C. A. Metro de Caracas, y los resultados de una auditoría energética, realizada para determinar el consumo de electricidad en el edificio.

El capítulo IV trata sobre el análisis económico de los equipos, se analizan los costos y recuperación de inversión en función de sus capacidades de ahorro en el edificio.

En el capítulo V, se selecciona el equipo factible a incorporar en el edificio piloto, mediante el Método de Decisión Múltiple Binaria.

## I. PROBLEMÁTICA DE DÉFICIT DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN VENEZUELA.

### 1.1 El Sector Eléctrico Nacional.

El Sector Eléctrico Venezolano está estructurado en forma mixta, integrado por empresas públicas y privadas, cuyos lineamientos de política son dictados por el Ministerio de Energía y Minas (MEM), órgano supremo en materia de energía a nivel nacional.

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) lo conforman 13 empresas eléctricas, 8 de ellas de carácter privado y 5 de carácter público (ver **Tabla 1.1**), algunas de las cuales se conforman por empresas filiales en el área de distribución, agrupadas en la Cámara Venezolana de la Industria Eléctrica (CAVEINEL).

**Tabla 1.1:** Empresas del Sector Eléctrico Nacional.

EMPRESA	PÚBLICA	PRIVADA
Empresa de Energía Eléctrica del Estado Venezolano (CADAFFE)	✓	
Electrificación del Caroní C.A. (EDELCA)	✓	
C.A. Energía Eléctrica de Venezuela (ENELVEN)	✓	
C.A. Energía Eléctrica de la Costa Oriental (ENELOCO)	✓	
Energía Eléctrica de Barquisimeto (ENELBAR)	✓	
Electricidad de Caracas (ELECAR)		✓
Electricidad de Valencia (ELEVAL)		✓
Electricidad de Ciudad Bolívar (ELEBOL)		✓
C.A. Luz Eléctrica de Venezuela (CALEV)		✓
C.A. Electricidad de Guarenas y Guatire (ELEGGUA)		✓
C.A. Luz Eléctrica de Yaracuy (CALEY)		✓
C.A. Luz y Fuerza Eléctrica de Puerto Cabello (CALIFE)		✓

Entre las empresas estatales se destacan EDELCA y CADAFE, responsables de la mayor parte del SEN, mientras que ENELVEN, ENELCO y ENELBAR prestan servicio a la región occidental del país. La Electricidad de Caracas y sus filiales conforman el grupo privado más importante, ofreciendo servicio a los clientes de Caracas y la zona metropolitana del país.

El SEN está integrado por los siguientes organismos:

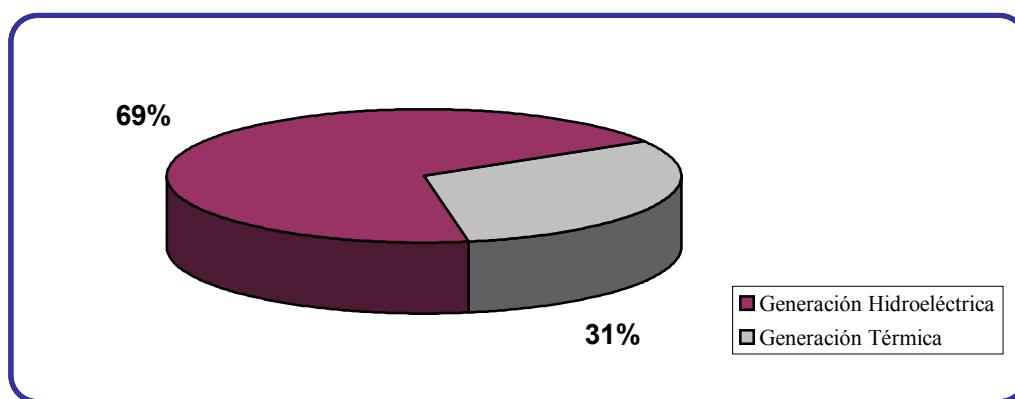
- El MEM, órgano rector del sector energético nacional.
- CAVEINEL, cámara que agrupa todas las empresas del servicio eléctrico público.
- La Oficina de Operación de Sistemas Interconectados (OPSIS), ente responsable de supervisar y coordinar la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN).
- Comité de Electricidad (CODELECTRA), encargada de emitir normas generales para los fabricantes de materiales y equipos que utiliza el sector eléctrico.

La generación de energía eléctrica en Venezuela está constituida por dos componentes: el sector hidroeléctrico y el sector termoeléctrico. La generación hidroeléctrica constituye el suministro principal del SEN, aporta aproximadamente el 70% de la energía total que se genera; la principal central hidroeléctrica es llamada “Raúl Leoni” o “Guri”, la cual, junto a la represa Macagua, constituyen las fuentes de generación hidroeléctrica de mayor importancia en el país. Por su parte, el sector termoeléctrico, está constituido por unidades de generación de turbovapor, turbogas y diesel, ésta ultima en menor porcentaje; algunas de las plantas termoeléctricas que constituyen este sector son las siguientes: “Pedro Camejo”, “Planta Centro”, “Oscar Augusto Machado”, entre otras<sup>14</sup>.

## 1.2 Datos de Generación y Potencia del SEN.

El SEN, para el año 2001, contó con una capacidad instalada de 20316 MW, de lo cual, 7200 MW correspondió a la capacidad termoeléctrica y 13116 MW correspondió a la capacidad hidroeléctrica<sup>2</sup>. Esto, representa un incremento del 1,28% con respecto a la capacidad instalada del año anterior (año 2000), debido a la incorporación de unidades en mantenimiento.

En el año 2001, la energía generada alcanzó la cifra de 87532 GWh, lo cual representa un incremento del 6,02% con respecto a la producción del año 2000<sup>2</sup>. En la **Figura 1.1** se muestra la distribución porcentual del aporte de cada uno de los sectores de generación eléctrica existentes en el país.



**Figura 1.1:** Aporte de los Sectores de Generación Eléctrica 2001

La **Tabla 1.2** muestra un resumen de los datos característicos de generación eléctrica en los últimos años. En ella se observa una diferencia de aproximadamente 25% entre la generación de energía y el consumo, lo cual corresponde al margen de reserva de generación, e indica el porcentaje de la capacidad firme de generación sobre la demanda máxima de electricidad en el país.

**Tabla 1.2:** Datos Característicos de Generación Eléctrica 1998-2001<sup>1</sup>

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	1998	1999	2000	2001
CAPACIDAD	MW	20633	20276	20059	20316
TERMOELÉCTRICA	MW	7409	7061	6848	7200
HIDROELÉCTRICA	MW	13224	13215	13211	13116
DEMANDA	MW	10854	11230	11938	12463
GENERACIÓN	GWh	79438	78838	82560	87532
TERMOELÉCTRICA	GWh	21515	18238	19674	27083
HIDROELÉCTRICA	GWh	57923	60600	62886	60449
CONSUMO	GWh	59570	59052	61159	64389

### 1.3 Problemática Energética de las Centrales de Generación Térmica e Hidráulica de Venezuela.

La represa hidroeléctrica Raúl Leoni o Guri aporta aproximadamente el 60% del total de la energía que se consume en el país. Durante los dos (2) últimos años, ésta ha presentado problemas ocasionados por la disminución en sus niveles de agua, debido a los últimos períodos de sequía, lo que ha traído como consecuencia que el promedio de descenso en su nivel de agua alcance aproximadamente el 15%. En la **Tabla 1.3** se muestran los niveles de operación característicos de la represa Guri.

**Tabla 1.3:** Niveles de Operación de la Represa Guri.

Nivel de Operación del Embalse Raúl Leoni.	Cota.
Nivel Máximo Infrecuente	271,60 msnm
Nivel Normal de Operación	271,00 msnm
Nivel Mínimo de Operación	240,00 msnm

Durante el año 2002, en la represa Guri se registraron cotas de operación muy cercanas al nivel mínimo de operación. En el período de sequía, el nivel de agua alcanzó el valor de 250 m; esto representó una etapa crítica para el embalse, ya que niveles por debajo de los 248 m implican una disminución de un 60% en la generación, a efectos de impedir daños a las máquinas por causa de la presencia de cavitación, lo cual a su vez también afectaría a las represas de Macagua. Sin embargo, aunque en el año 2002 el nivel de la represa Guri no alcanzó la cota mínima de operación, se estima que en el año 2003 se alcancen cotas por debajo de los 248 m.

Para suplir el 30% restante de la energía requerida en el país y también para compensar cualquier falla de generación en el sector hidroeléctrico, se cuenta con las plantas termoeléctricas. El parque termoeléctrico de Venezuela cuenta con una capacidad instalada de 40000 GWh, pero, sólo está en capacidad de aportar 27500 GWh, con lo cual no logra compensar los efectos climatológicos que aquejan las centrales hidroeléctricas debido a los múltiples problemas que presenta, que se listan a continuación:

- El parque termoeléctrico no tiene alta disponibilidad. Según pruebas de acreditación realizadas por las empresas que conforman el SIN, aproximadamente el 70% de sus máquinas está obsoleto y presenta bajos niveles de eficiencia.
- Los programas de mantenimiento no son suficientemente rigurosos como para mantener en condiciones óptimas a las unidades de generación.
- Falta de inversión, debida a las condiciones sociales del país; inversión destinada a rehabilitaciones, programas de mantenimiento y/o repotenciaciones.
- Problemas por hurto y fraude a las empresas de energía eléctrica, que representan cifras millonarias de pérdidas.

Aunado a lo anterior, las unidades de generación instaladas en Caruachi, que se había previsto entraran en operación a comienzos del año 2003, para aportar 2160 MW, no serán incorporadas al SEN sino hasta finales del presente año, lo cual no contribuye en solucionar la situación de déficit de energía eléctrica.

Por otra parte, el consumo de energía eléctrica en Venezuela ha ido incrementando con el paso de los años. En los últimos dos (2) años, se ha observado un mayor porcentaje de crecimiento: en el año 2001, el consumo promedio de energía eléctrica se ubicó en 64389GWh, que representó un incremento del 5,28% con relación al año 2000 y la tendencia para el año 2003, es de un incremento mayor a 6%.

A su vez, el crecimiento anual de las exigencias del servicio eléctrico, en la población venezolana, ha sido inesperado en los dos últimos años. De acuerdo con las estimaciones realizadas por CAVEINEL, el porcentaje de crecimiento esperado para la demanda era de 4,5%; sin embargo, en el año 2001, se ubicó en 6% y se estima en 7,7% para el año 2003, debido a diversos factores, tales como: el incremento en los robos de electricidad producidos, básicamente, por el crecimiento de la informalidad y la pobreza en el país y además, el incremento en la adquisición de equipos eléctricos de baja eficiencia en el sector residencial.

También se debe considerar para los requerimientos de energía del país, un margen de reserva de capacidad, determinado para satisfacer la demanda y su crecimiento. Esta reserva, se utiliza por la indisponibilidad de los equipos por mantenimiento forzado y programado; para el sistema venezolano el margen de reserva estimado es de 30% sobre la demanda, para alcanzar niveles aceptables de confiabilidad y seguridad, sin embargo, como se indicó anteriormente, el margen de reserva en los últimos años ha disminuido, ubicándose en el orden del 25% sobre la demanda

#### **1.4 Medidas Gubernamentales ante la Problemática del Sector Eléctrico.**

Las limitaciones que enfrenta la industria eléctrica para satisfacer la demanda creciente de energía de este período y la necesidad de mantener la calidad de operación de los

equipos de Guri, motivaron a decretar un estado de emergencia eléctrica nacional, por lo cual, el Ejecutivo Nacional inició, a comienzos del año 2002, una campaña de ahorro de electricidad.

Existen dos (2) maneras para lograr ahorro de electricidad: una de ellas es mediante la reducción de la demanda de energía y otra mediante la reducción del consumo. Con la reducción de la demanda de energía se busca disminuir el gasto energético en KVA, principalmente en el sector industrial, mientras que, la reducción del consumo, busca disminuir, como su nombre lo indica, el consumo energético en KWh, tanto en el sector industrial, como en el comercial y residencial.

En la declaración de emergencia eléctrica nacional, el Ejecutivo Nacional consideró la reducción del consumo energético, por su simplicidad en ejecución y la necesidad de crear conciencia en la población sobre el ahorro de energía. Una de las medidas tomadas para disminuir el consumo de energía eléctrica en el país, es la disminución de la frecuencia de operación del SEN de 60 Hz a 59,9 Hz, como medida temporal.

En febrero de 2002, el Ejecutivo Nacional publicó el decreto 1629, bajo Gaceta Oficial N° 37377, que expresó la orden de ejecución de un programa de ahorro de energía en dependencias públicas, basada en la disminución del consumo de energía eléctrica. Este decreto, constituido por 9 artículos, declara la orden de disminución del consumo de energía eléctrica, por parte de los organismos de las dependencias públicas, en un 20% durante el año 2002 y hasta febrero del año siguiente.

Con el propósito de proporcionar apoyo al Decreto 1629, el MEM se encarga de ofrecer material informativo, manuales técnicos, cursos de capacitación y charlas a funcionarios de enlace y demás entes relacionados con el programa de ahorro de energía.

De igual manera, fue creada una guía operativa de ahorro de energía en edificaciones públicas, la cual fue difundida durante la realización de talleres organizados por MEM y dictados por el Instituto de Energía (INDENE), adscrito a la Universidad Simón Bolívar

(USB) y del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), adscrito a la Facultad de Arquitectura de la Universidad Central de Venezuela.

La *Guía de Operaciones de Ahorro de Energía Eléctrica en Edificaciones Públicas* está orientada a la puesta en práctica de procedimientos, acciones y medidas que contribuyan al uso eficiente de la energía eléctrica en edificaciones públicas, por lo que establece pautas que tienen aplicación en los componentes, instalaciones y equipos de las edificaciones y de su entorno; dichas pautas están clasificadas según el costo o la inversión estimada, para ser aplicadas en tres (3) niveles<sup>16</sup>.

En relación a los mecanismos de control e inspección para dar cumplimiento al programa de ahorro de energía, la División de Ambiente y Uso Eficiente de la Energía, perteneciente al MEM, se encarga de realizar las actividades correspondientes.

Por otra parte, la disposición oficial establece incentivos adicionales para atraer la inversión en el sector de generación de energía eléctrica, tales como exoneraciones de impuestos arancelarios y del Impuesto al Valor Agregado (IVA).

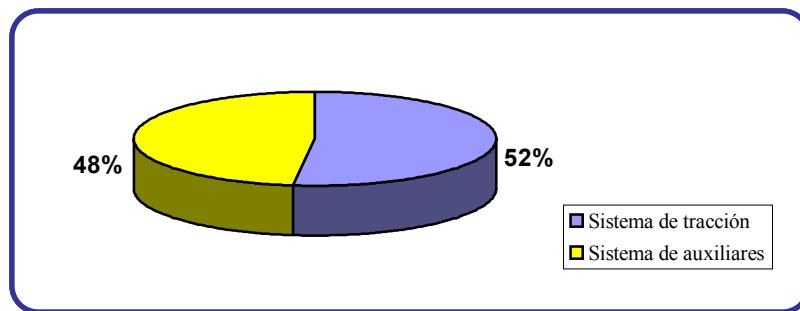
### **1.5 Consumo de Energía Eléctrica en la C.A. Metro de Caracas.**

El sistema eléctrico de la C.A. Metro de Caracas se divide en dos grupos básicos: a) sistema de electrificación para tracción y b) sistema de electrificación para servicios auxiliares.

El sistema de electrificación para tracción comprende todas las instalaciones y equipos necesarios para el suministro de la energía requerida para el desplazamiento de los trenes, tiene un consumo promedio que se ubica en el orden del 52% del consumo total de energía de la C.A Metro de Caracas.

El sistema de electrificación para servicios auxiliares comprende todo lo relacionado con el suministro eléctrico a los diferentes equipos que se encuentran en las estaciones de pasajeros, estructuras de ventilación, patios y talleres, plantas de refrigeración y edificios

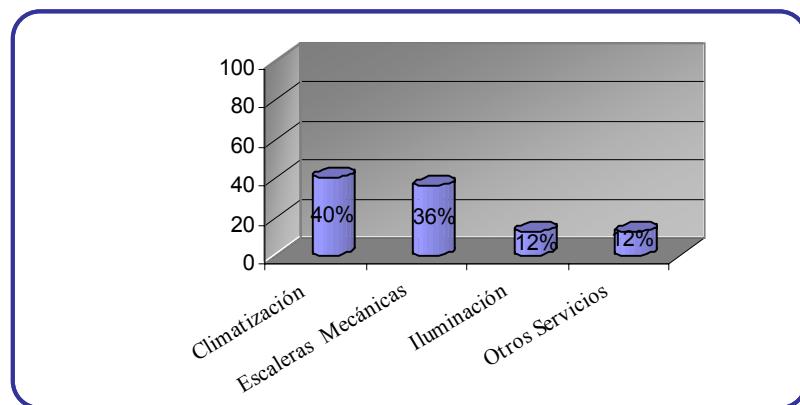
de control de operaciones. La **Figura 1.2** representa la distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en la C.A. Metro de Caracas.



**Figura 1.2:** Consumo de Energía Eléctrica de la C.A. Metro de Caracas.

En relación con el consumo de energía de sistemas de grupos auxiliares, éste se subdivide de la siguiente manera, como se muestra en la **Figura 1.3**.

- Climatización 40%
- Escaleras mecánicas 36%
- Iluminación 12%
- Otros servicios (bombas de agua y drenaje, sistemas de seguridad, dispositivos eléctricos, misceláneos, etc.) 12%



**Figura 1.3:** Consumo de Energía Eléctrica del Sistema de Grupos Auxiliares.

La C.A. Metro de Caracas, motivada por su alto consumo de energía eléctrica, el cual se ubica alrededor del 20% del total de gastos de la empresa, y por la obligatoriedad de cumplimiento del decreto 1629 como entidad pública, reactivó el Comité de Ahorro de Energía, para elaborar un plan que permita disminuir el consumo energético de la empresa.

Para facilitar la disminución del consumo de electricidad en la empresa, el Comité de Ahorro de Energía de C.A. Metro de Caracas estableció un plan estratégico que consta de tres fases, apoyadas en las acciones recomendadas en la *Guía Operativa de Ahorro de Energía Eléctrica en Edificaciones Públicas*; dichas fases se establecieron de acuerdo a la inversión financiera requerida para su implementación.

Al respecto, ya se han puesto en práctica políticas de nivel 1, que no requieren inversiones y están relacionadas con cambios en los hábitos o reorganización de los recursos, tales como: la reubicación de equipos de oficina, redistribución de horarios para la utilización de las escaleras mecánicas y equipos de climatización de la Línea 3 (Plaza. Venezuela-El Valle), entre otras.

De igual manera, se han desarrollado acciones de nivel 2, las cuales involucran bajas inversiones, están relacionadas con el reemplazo o instalación de equipos menores y la utilización de equipos en inventario; entre las cuales se tienen: incorporación de variadores de frecuencia y sustitución de temporizadores deteriorados en escaleras mecánicas, sustitución progresiva del sistema de iluminación convencional por sistemas de mayor eficiencia, entre otras.

De la necesidad de dar continuidad a los planes de ahorro de energía en la C.A. Metro de Caracas, con la puesta en marcha de acciones de nivel tres (3), que implican inversiones importantes y requieren de una evaluación económica en función del ahorro esperado, además de el uso de nuevas tecnologías de control y monitoreo de las instalaciones, surge el desarrollo de este estudio, con el objeto de seleccionar el equipo adecuado para reducir el consumo de energía eléctrica de los sistemas de climatización. Para ello, se tomarán en consideración los equipos de ahorro de energía de última tecnología

presentes en el mercado y se realizará un estudio de factibilidad entre ellos, a fin de determinar el más idóneo, aplicando el Método de Decisión Múltiple Binaria para la toma de decisiones.

Además de determinar la factibilidad de uso de los equipos bajo estudio en los sistemas de climatización para disminuir el consumo de energía, se darán a conocer los diferentes equipos tecnológicos de ahorro de energía eléctrica existentes en el mercado, y se aplicará un método avalado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y la American Society Mechanical Engineering (ASME), para reducir la probabilidad de incertidumbre en el proceso de toma de decisiones en la selección de los equipos.

## II. EQUIPOS DE AHORRO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

Las edificaciones constituyen el escenario fundamental de las actividades humanas, a la vez que son grandes consumidoras de energía, alrededor del 50% de la energía consumida en las ciudades corresponde a los edificios, el resto corresponde a industria y transporte. En Venezuela destaca el hecho de que en general nuestras edificaciones siguen patrones de diseño que no responden a criterios bioclimáticos adecuados, requiriendo en casi todos los casos, considerables sistemas de acondicionamiento mecánico<sup>16</sup>; es por ello que se hace evidente la importancia de armonizar el uso racional de la energía con un nivel adecuado de calidad de vida, ya sea mediante un cambio de hábitos inadecuados en el uso de equipos, como en la implementación de nuevas tecnologías y sistemas de mayor eficiencia.

### 2.1 Sistemas de Climatización.

Un sistema de aire acondicionado debe proporcionar en un ambiente condiciones adecuadas de temperatura, humedad, movimiento del aire, calidad del aire, ventilación y nivel acústico que produzca en los ocupantes la sensación de “confort”<sup>4</sup>.

Todo sistema de aire acondicionado consta básicamente de los siguientes componentes (existiendo diferentes tipos de cada uno):

- a) Equipo de refrigeración: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador.
- b) Equipo de disipación de calor a la atmósfera.
- c) Equipo de manejo de aire.
- d) Equipo de suministro y distribución de aire (ductos, rejillas, etc).

Los sistemas de aire acondicionado se clasifican en dos grandes grupos: sistemas de expansión directa y sistemas centrales, a continuación se realiza una breve descripción de ellos.

Sistemas de expansión directa: se caracterizan por el uso de un refrigerante para el enfriamiento del aire. Se clasifican en: a) sistemas individuales compactos, los cuales reúnen todos los componentes en una sola carcasa y sólo es necesario proveerlos de energía eléctrica y acceso exterior; b) sistemas en partición o tipo split, los cuales se caracterizan porque sus componentes forman parte de dos equipos: unidad de intercambio de calor y unidad de condensación.

Los sistemas centrales se caracterizan por tener el equipo de refrigeración centralizado y común a todos los ambientes a tratar. Emplean agua como medio de enfriamiento y deshumidificación del aire, utilizando un sistema de tuberías y bombas, a través de los serpentines de las unidades de manejo de aire (UMAs), las cuales pueden ubicarse en el interior o fuera del ambiente a acondicionar. Las UMA constan básicamente del serpentín de enfriamiento y deshumidificación y de los ventiladores para el suministro del aire.

Las bombas y ventiladores se rigen por las siguientes leyes de proporcionalidad:

1.- El flujo de operación y la velocidad son directamente proporcionales, de acuerdo a la ecuación 2.1:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$Q_1$ : flujo nominal de la bomba o ventilador

$Q_2$ : flujo decreciente

$n_1$ : velocidad nominal de la bomba o ventilador

$n_2$ : velocidad decreciente

2.- La presión presenta una dependencia cuadrática respecto a la velocidad, (Ecuación 2.2).

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 2. 2}$$

Donde:

$H_1$ : presión nominal de la bomba o ventilador

$H_2$ : presión decreciente

$n_1$ : velocidad nominal de la bomba o ventilador

$n_2$ : velocidad decreciente

3.- La potencia presenta una dependencia cúbica respecto a la velocidad, (Ecuación 2.3).

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad \text{Ecuación 2. 3}$$

Donde:

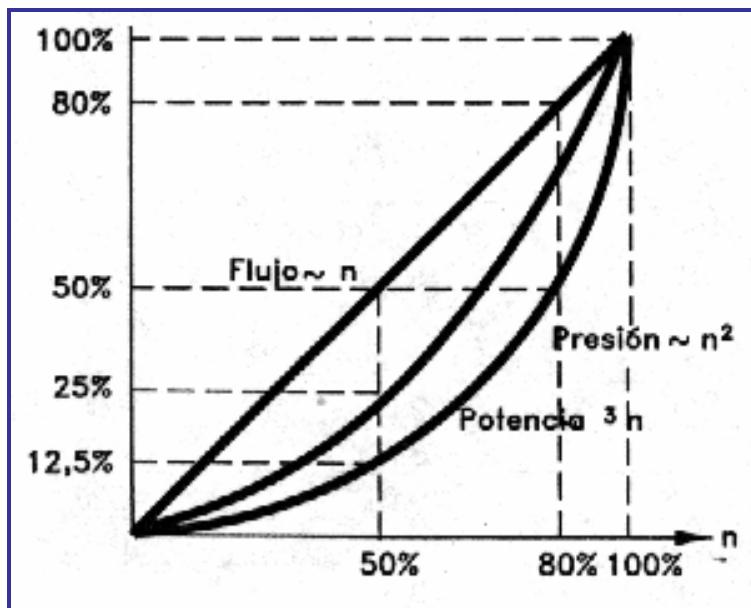
$P_1$ : potencia nominal de la bomba o ventilador

$P_2$ : potencia decreciente

$n_1$ : velocidad nominal de la bomba o ventilador

$n_2$ : velocidad decreciente

Tales leyes de proporcionalidad, de bombas y ventiladores, se muestran representadas en la **Figura 2.1.**



**Figura 2. 1:** Leyes de Proporcionalidad de Bombas y Ventiladores.

## 2.2 Equipos de Ahorro de Energía en Sistemas de Climatización.

El desarrollo tecnológico actual ha incrementado la cantidad de equipos y recursos disponibles para ahorrar energía eléctrica en sistemas de climatización. Estos equipos, se utilizan para aplicar medidas de corrección en sistemas instalados, teniendo especial cuidado de no disminuir las condiciones de confort y productividad de los usuarios.

Existen dos (2) grandes grupos tecnológicos de equipos de ahorro de energía: los de funcionamiento mecánico y los de tipo electrónico.

El grupo de los equipos mecánicos está conformado por equipos que actúan sobre las propiedades termodinámicas del aire, modificando su humedad, temperatura, etc, para luego facilitar su manejo en unidades de ventilación y acondicionamiento de aire. En este grupo se encuentran: las ruedas entálpicas, ruedas disecantes, deshumidificadores, entre otros.

Los equipos electrónicos se encargan de regular el funcionamiento de los motores, compresores, bombas y ventiladores, de manera de adaptarlos a las necesidades de uso y

ocupación del momento de trabajo. Ejemplo de tales equipos son los variadores de frecuencia y los truncadores de potencia.

Existe un tercer grupo más reducido, que reúne las características de los equipos mecánicos y electrónicos, dentro de este grupo se encuentran los sensores de CO<sub>2</sub>, los cuales, monitorean la calidad de aire interior, para establecer la regulación de los motores en función a ello. El uso de equipos de ahorro de energía de cualquiera de los grupos mencionados, genera grandes beneficios, por una parte mejoran la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado, debido a que regulan sus condiciones de operación y disminuyen sus costos de mantenimiento, mientras que por otra parte, reducen la cantidad de energía consumida por los mismos.

### **2.2.1 La Rueda Entálpica.**

Las ruedas entálpicas (ERV) son equipos de última tecnología, que, se utilizan en acondicionamiento de aire para recuperar energía, disminuir las cargas sensibles y latentes en el aire de ambientes con sistemas instalados de aire acondicionado, sin afectar las condiciones de confort y calidad de aire, manteniendo un suministro adecuado de aire externo.

La rueda entálpica actual, pertenece a la familia de ruedas disecantes que comenzó a utilizarse en los años 70, durante la crisis de energía de esa época. Los equipos de ruedas que se utilizaban en aquellos años tenían un diseño de gran tamaño, difícil mantenimiento y su aplicación era estrictamente para uso industrial. Luego, gracias a los avances tecnológicos de última generación, fue desarrollado el diseño actual de la rueda entálpica, destinada a instalaciones comerciales y con características favorables, como lo son sus dimensiones y el mantenimiento sencillo que requieren.

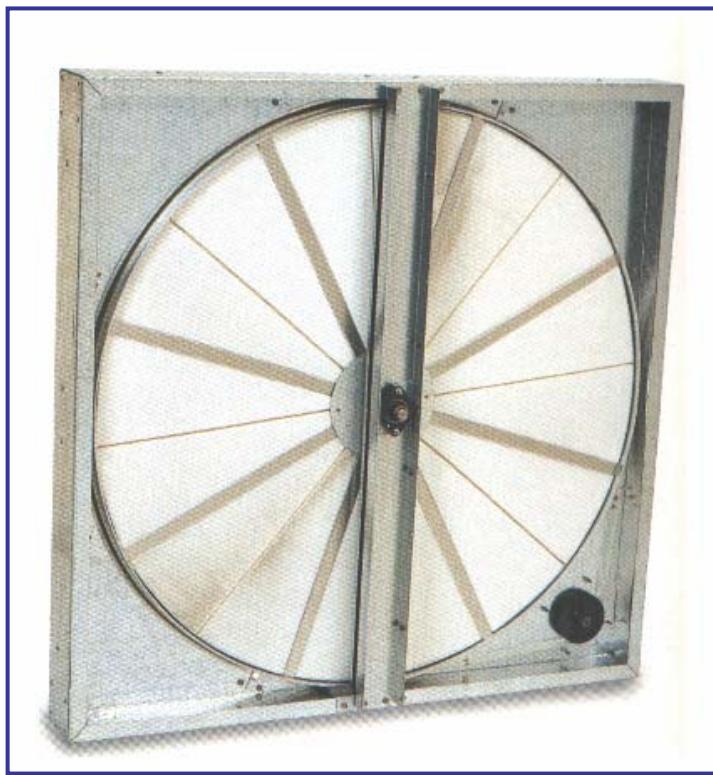
El principio de operación de la rueda entálpica, de donde proviene su nombre, se basa en mantener constante la entalpía entre el aire de retorno y el aire exterior del ambiente; sin embargo, la entalpía no se mantiene constante, sino que, al mezclarse ambas corrientes

de aire, se consigue un diferencial de entalpía muy bajo con respecto al aire de suministro, ya que el proceso depende de la eficiencia de la rueda.

La rueda entálpica se encarga de preacondicionar el aire fresco en equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado, ya sea en época de verano o de invierno. Durante el verano, la rueda enfriá el aire fresco externo y rechaza la humedad, mientras que durante el invierno, la rueda calienta y humidifica el aire fresco externo.

#### 2.2.1.1 Descripción de las Ruedas Entálpicas.

La rueda entálpica es una unidad compacta, compuesta por paneles removibles que contienen una rueda, dos motores, dos ventiladores y filtros, en la **Figura 2.2** se muestra un modelo de rueda entálpica, la misma tiene una vida útil de 20 años.

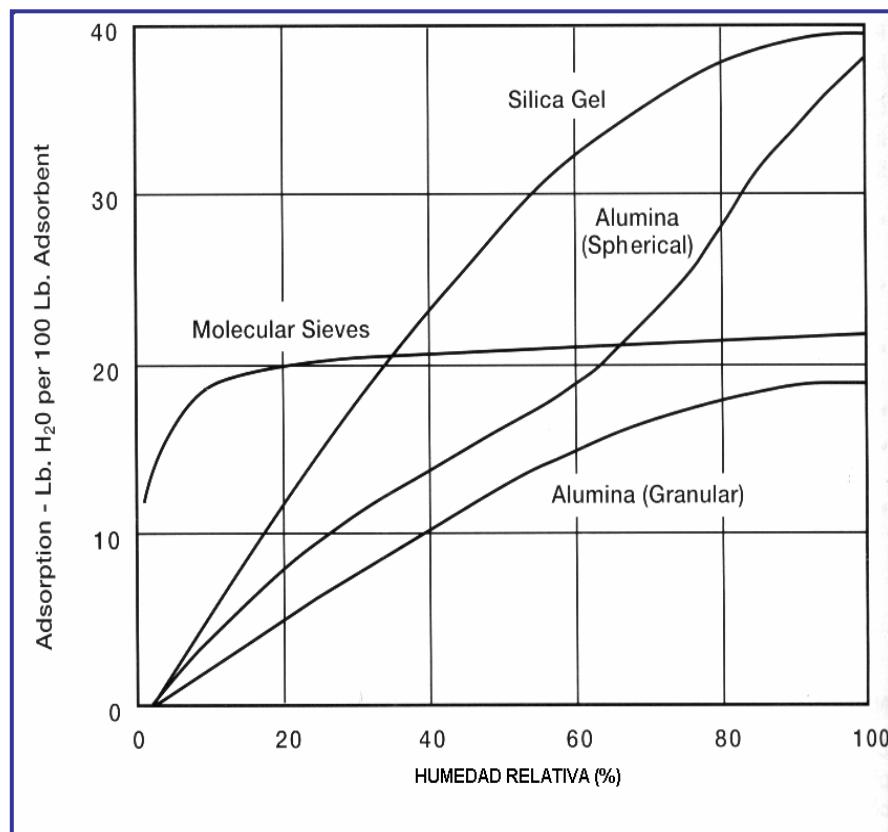


**Figura 2.2:** Rueda Entálpica.

La rueda está constituida internamente, por material disecante de silica gel, el cual, es altamente poroso, adsorbente y, estructuralmente, parece una esponja rígida. Este

material tiene un área de superficie interna compuesta de innumerables cavidades microscópicas y un vasto sistema de canales capilares, que conectan dichas cavidades internas a la superficie exterior de la “esponja”.

El silica gel es el tipo de disecante más eficiente en el método de transferencia de humedad para humedades relativas cercanas a 35% y dentro del rango de confort humano. En la **Figura 2.3**, se observa que el disecante silica gel es capaz de adsorber mayor cantidad de humedad que otros disecantes cuando se encuentra a niveles de humedad relativa mayores a 35%, niveles típicos en corrientes de aire de suministro y aire viciado, en sistemas de aire acondicionado.



**Figura 2. 3:** Capacidad de adsorción de distintos disecantes.

Además de vapor de agua, los disecantes son capaces de adsorber muchas especies químicas. Sin embargo, las moléculas de vapor de agua, altamente polares y poseedoras de una fuerte atracción hacia la superficie del silica gel, superan la atracción entre el

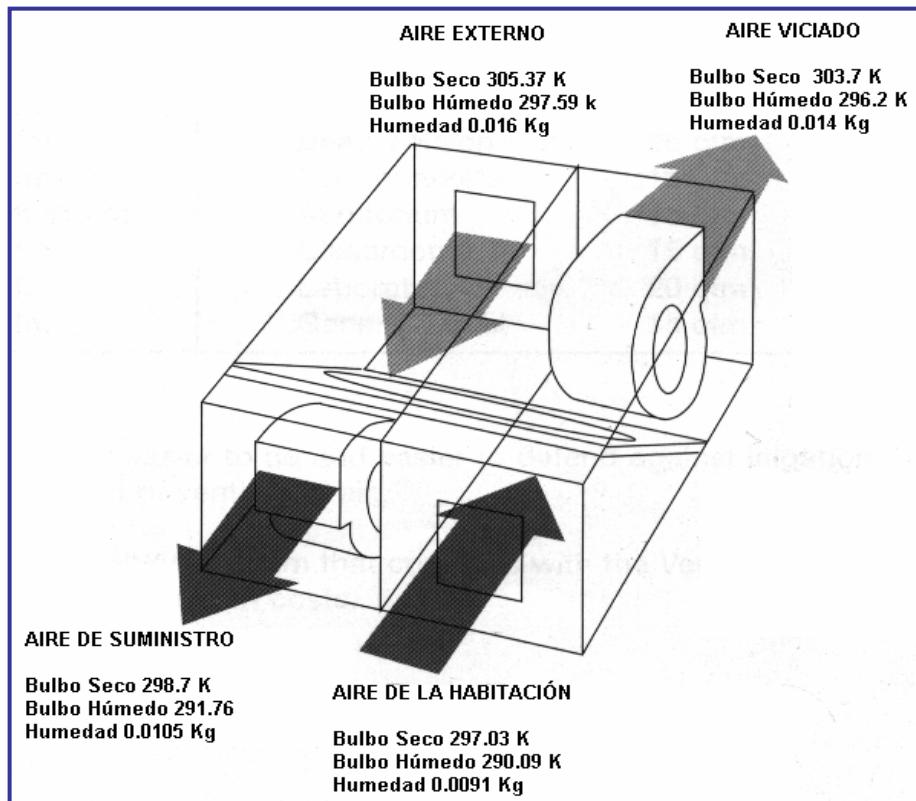
disecante y otras especies químicas, por lo cual las ruedas entálpicas, no pueden transferir otras sustancias gaseosas además de vapor de agua, ya que las mismas disipan a cualquier otra molécula y se desplazan hasta el sitio de adsorción.

### **2.2.1.2 Funcionamiento de las Ruedas Entálpicas.**

La rueda entálpica trabaja utilizando tanto el aire de retorno, como el aire fresco del sistema de aire acondicionado. Dentro de ella se llevan a cabo dos (2) procesos básicos: recuperación de energía de la corriente de aire viciado o proceso de preacondicionamiento de aire y mezcla del aire preacondicionado con el aire de retorno.

El objetivo del proceso de preacondicionamiento del aire en la rueda entálpica es disminuir el diferencial de entalpía entre la corriente de aire fresco y la corriente de aire de retorno o aire interior, por medio de una disminución en la carga sensible (temperatura) y carga latente (humedad) del aire fresco, para que la carga térmica manejada por la UMA, en caso de uso de sistemas centrales, sea menor y por ende, también sea menor la cantidad de energía absorbida por los equipos de aire acondicionado.

El proceso de recuperación de energía, se produce cuando la corriente de aire fresco y una parte de la corriente de aire de retorno, llamada aire viciado, atraviesan el área de la rueda constituida por el disecante. Las variaciones en las propiedades termodinámicas que experimentan en este proceso se muestran en la **Figura 2.4**. En esta etapa, la corriente de aire fresco experimenta un proceso de enfriamiento con deshumidificación, debido a la acción del disecante, mientras que el aire de retorno es utilizado para absorber la carga latente que cede el aire fresco y posteriormente es desecharo.



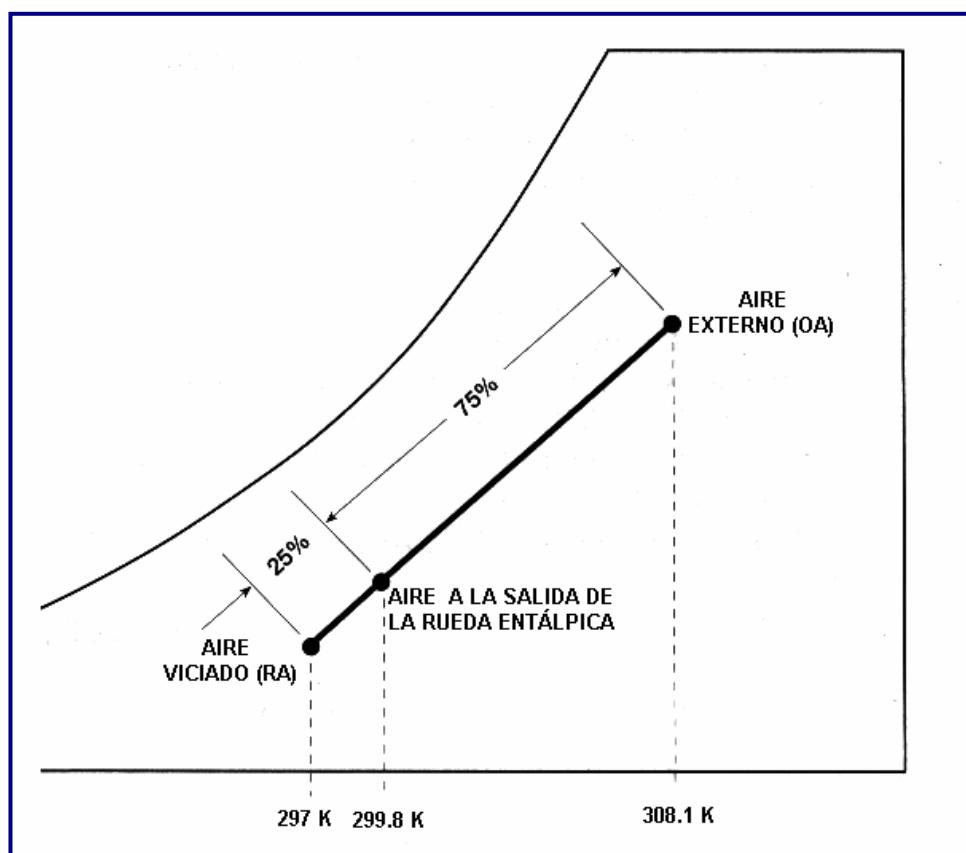
**Figura 2. 4:** Proceso de Recuperación de Energía en la Rueda Entálpica.

El proceso de deshumidificación ocurre principalmente por dos diferentes mecanismos. Las moléculas de vapor de agua del aire fresco, inicialmente, se adhieren a la superficie del silica gel completamente limpio o seco, por atracción molecular; con lo cual se forma una capa mono-molecular, para atacar la superficie del silica gel, y luego es atraída una mayor cantidad de agua, la cual se acumula en los canales capilares, por medio del mecanismo de condensación capilar.

Durante la condensación capilar, el agua moja las paredes del canal capilar y forma un menisco cóncavo a la fase de vapor, la presión de vapor sobre el menisco al ser más baja que la presión de vapor normal del líquido, por una cantidad proporcional al grado de curvatura del menisco, permite que los pequeños capilares de los poros del disecante puedan condensar el vapor a presiones mucho más bajas que la presión de vapor normal.

Los poros de pequeño diámetro, producen grandes bajas de presión, lo cual resulta en mayor absorción a baja presión y humedad relativa.

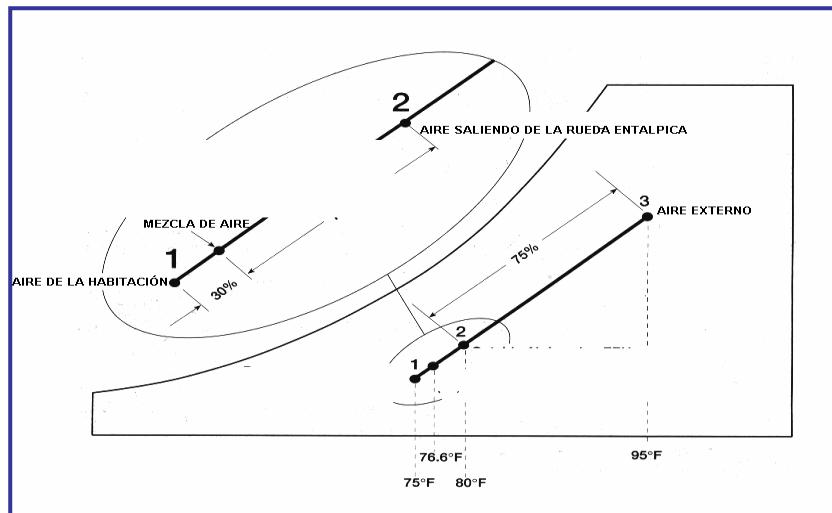
La eficiencia de este proceso depende del modelo de rueda entálpica que sea seleccionado, varía desde 69% hasta 78%, por lo cual las condiciones termodinámicas de temperatura y entalpía de la corriente preacondicionada disminuyen en ese nivel de eficiencia, comprobado experimentalmente, en la **Figura 2.5** se muestra el caso de una rueda entálpica cuya eficiencia es del 75%.



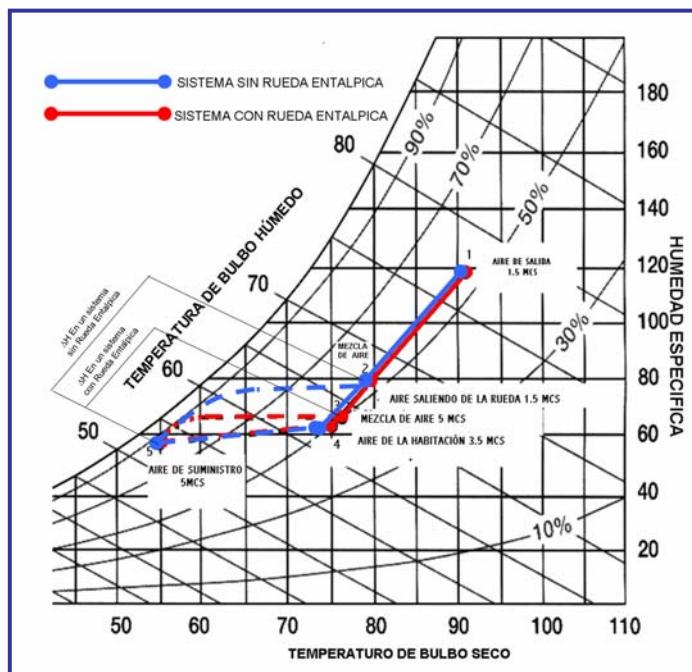
**Figura 2. 5:** Recuperación de Energía de las Corrientes de Aire en una Rueda Entálpica.

El segundo proceso consiste en la mezcla adiabática entre la corriente de aire preacondicionado en la rueda y la corriente del aire de retorno. Se dice que es adiabática porque la transferencia de calor con los alrededores es despreciable. Las condiciones termodinámicas de la corriente resultante dependen de las proporciones y propiedades termodinámicas de cada corriente de aire. En la **Figura 2.6** se muestra el caso donde la

corriente de aire de retorno (punto 1) representa el 70% del flujo total de aire y la corriente de aire preacondicionado (punto 2) el 30%, luego, el punto de mezcla se encuentra ubicado en el punto 3.



**Figura 2. 6:** Proporciones de la Mezcla de Aire en la Rueda Entálpica



**Figura 2. 7:** Proceso Psicrométrico de la Mezcla de Aire en la Rueda Entálpica.

En la **Figura 2.7** se representa, en una carta psicrométrica, el proceso completo del aire en la rueda entálpica. El diferencial de entalpía entre la mezcla de aire y el aire de suministro disminuye en un 75%, como se muestra en la **Figura 2.7**, por lo que el equipo disminuye la cantidad de energía absorbida para su capacidad de enfriamiento, que es directamente proporcional al diferencial de entalpía, tal como se evidencia en la **Ecuación 2.4**.

$$ATE = 1,13398 * q * \Delta H$$

**Ecuación 2.4**

Donde:

ATE: energía total absorbida por el equipo de aire acondicionado (KW).

1,13398: factor de conversión.

q: caudal de aire que maneja el equipo de aire acondicionado ( $m^3/s$ ).

$\Delta H$ : diferencia entálpica entre el aire de suministro y la corriente de aire que sale de la rueda entálpica (KJ/Kg.).

Al disminuir la energía absorbida por el equipo, aumenta el índice energético “Coefficient of Performance” (COP) (**Ecuación 2.5**), esto produce un aumento en la eficiencia de los equipos de aire acondicionado.

$$COP = \frac{\text{Capacidad Enfriamiento}}{\text{Energía Absorbida}}$$

**Ecuación 2.5**

Donde:

COP: Coefficient of Performance.

Capacidad Enfriamiento: Capacidad de enfriamiento del equipo de aire acondicionado (KW).

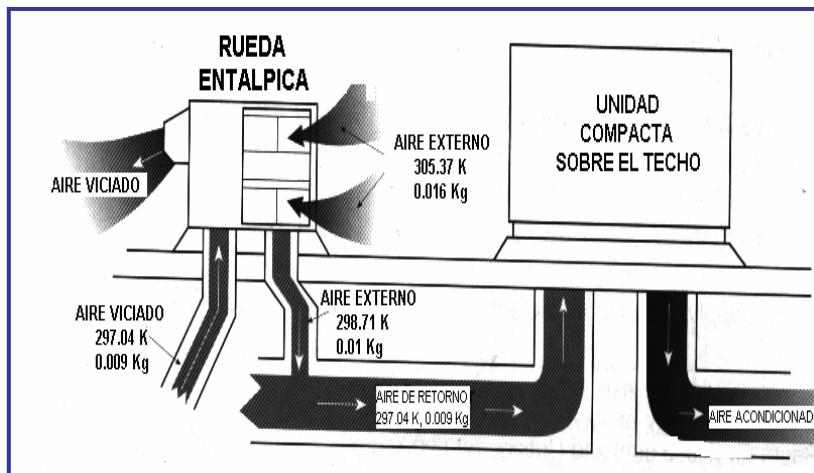
**Energía Absorbida:** Energía absorbida por el equipo de aire acondicionado para desarrollar la capacidad de enfriamiento (KW).

El aumento del COP indica que la energía absorbida por el sistema de aire acondicionado ha disminuido, a pesar de que se mantiene la misma capacidad de enfriamiento; con lo cual, se demuestra la posibilidad de reemplazar los equipos instalados por otros de menor capacidad.

#### 2.2.1.3 Ubicación de las Ruedas Entálpicas en los Sistemas de Climatización.

Las ruedas entálpicas pueden adaptarse a sistemas de aire acondicionado de tipo compactos, y centrales, para lo cual sólo requieren agregar ductos de comunicación entre el sistema de aire acondicionado y la rueda entálpica. Existen dos (2) tipos básicos de arreglo en los sistemas de aire acondicionado para ubicar la rueda entálpica, especificados a continuación:

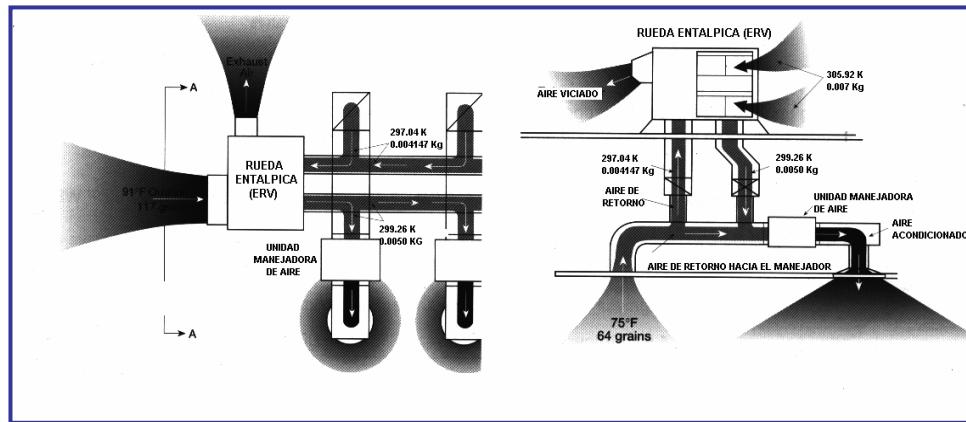
- Con equipos compactos sobre el techo, tal como se muestra en la **Figura 2.8**.



**Figura 2. 8:** Rueda Entálpica con Equipos Compactos.

- Con sistemas centrales y unidades de manejo de aire. En este caso la rueda entálpica puede colocarse en el área de la UMA, ambas ocupando un único espacio, o en el techo de la sala de UMAs. La rueda entálpica puede

preacondicionar el aire y distribuirlo a varias UMA's simultáneamente. La **Figura 2.9** muestra este tipo de arreglo de rueda entálpica.



**Figura 2.9:** Rueda Entálpica con Unidades de Manejo de Aire.

#### 2.2.1.4 Mantenimiento Requerido por las Ruedas Entálpicas

El mantenimiento adecuado es la clave para extender la vida de cualquier componente de un sistema de calefacción y aire acondicionado y también para proveer calidad de aire interior (IAQ) en los ambientes controlados.

El diseño de las ruedas entálpicas requiere un mínimo y sencillo mantenimiento, pues posee las siguientes características:

- Paneles removibles, que dan fácil acceso a la rueda, ventilador, motores y demás componentes de manejo.
- La caja de la rueda puede removese fácilmente para inspección y mantenimiento, como se puede observar en la **Figura 2.10**.
- Las secciones se pueden extraer sin herramientas, para realizar la limpieza periódica.
- Filtros fácilmente accesibles.

- No necesita desagüe de condensado. La humedad es totalmente transferida en la fase de vapor, por lo tanto, se eliminan las superficies húmedas que retienen polvo y promueven el nacimiento de bacterias.



**Figura 2. 10:** Rueda entálpica.

En relación a la limpieza, debido a que la rueda está en constante rotación, se mantiene limpia por una corriente de aire a contraflujo. Como la rueda siempre está seca, el polvo y partículas se fijan a la superficie durante medio ciclo, pero son automáticamente removidos durante el siguiente medio ciclo. Este proceso de limpieza ocurre en cada revolución de la rueda, aproximadamente 30/60 veces por minuto para ruedas de flujo estándar/alto, respectivamente.

#### **2.2.1.5 Ventajas del Uso de Ruedas Entálpicas.**

- Los costos de operación del sistema de aire acondicionado se reducen, pues se reduce la cantidad de energía absorbida por el sistema.
- Se reducen significativamente las dimensiones de los equipos de acondicionamiento de aire, ya que se pueden utilizar sistemas de aire acondicionado de menor capacidad.
- Se reducen los costos de instalación del sistema de aire acondicionado.
- Permiten incrementar las cantidades de aire externo, sin aumentar las dimensiones de los equipos de enfriamiento, tal como se muestra en la sección

2.1.8, de ejemplos de ahorro de energía al implementar una rueda entálpica en los sistemas de climatización.

#### **2.2.1.6 Desventajas del Uso de Ruedas Entálpicas.**

Su principal desventaja radica en que su aplicación en sistemas ya diseñados e instalados de aire acondicionado es limitada debido al espacio físico requerido. No es posible su implementación en sistemas con poco espacio adicional.

#### **2.2.1.7 Criterios de Selección.**

Para realizar la selección de una rueda entálpica para cualquier sistema de aire acondicionado o ventilación, deben considerarse dos factores fundamentales que determinan la mejor aplicación de estos equipos, estos factores son: el volumen de aire fresco del sistema, el cual determina el tipo de rueda entálpica a utilizar, así como sus dimensiones; y la disposición del aire de retorno y aire fresco, según la cual, se instala la rueda entálpica dentro o fuera del espacio a acondicionar, tomando en consideración la disponibilidad de espacio.

#### **2.2.1.8 Ejemplos de Ahorro de Energía utilizando Ruedas Entálpicas.**

Los siguientes ejemplos, muestran los casos de sistemas de aire acondicionado bajo las mismas condiciones de diseño, mostradas en la **Tabla 2.1**, y las mejoras obtenidas al utilizar ruedas entálpicas (Ejemplo 1) y ruedas entálpicas en conjunto con triplicación de volumen de aire fresco (Ejemplo 2).

**Tabla 2. 1:** Condiciones de Diseño de Sistema de Aire Acondicionado.

Propiedades	Aire Externo	Aire Retorno	Aire Suministro
Temperatura de Bulbo Seco (K)	305.93	297.03	285.93
Temperatura de Bulbo Húmedo (K)	298.15	---	284.81
Entalpía (KJ/Kg)	93.97	65.59	51.17
Humedad relativa (%)	---	50	---

		SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO TRADICIONAL SIN RUEDA ENTALPICA	SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO TRADICIONAL CON RUEDA ENTALPICA
Flujos de Aire	Aire de la Habitación (m <sup>3</sup> /s)	3,5	3,5
	Aire Fresco (m <sup>3</sup> /s)	1,5	1,5
	Mezcla de Aire (m <sup>3</sup> /s)	5	5
	Propiedades de la mezcla de Aire	299,71 K 292,82 K 74,13 KJ/Kg	299,71 K 292,82 K 74,13 KJ/Kg
PROCESO PSICROMÉTRICO DEL AIRE EN EL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO			
Diferencia Entálpica	$\Delta H = h_{ma} - h_s$ ma = mezcla de aire s = aire de suministro	<b>23,0274 KJ/Kg</b>	<b>16,267 KJ/kg</b>
Carga Total de Enfriamiento	$CIE=1.1398*q*\Delta H$ q = caudal de la mezcla $\Delta H$ = Diferencia Entálpica	<b>130,5631 Kw</b>	<b>92,2322 Kw</b>

Figura 2. 11: Ejemplo 1. Uso de Ruedas Entálpicas en Sistema de Aire Acondicionado.

		SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO TRADICIONAL SIN RUEDA ENTALPICA CON UN VOLUMEN DE AIRE EXTERNO (FRESCO) DE 0,5 MCS	SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO MODIFICADO SIN RUEDA ENTALPICA CON UN VOLUMEN DE AIRE EXTERNO (FRESCO) DE 1,5 MCS	SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO TRADICIONAL CON RUEDA ENTALPICA CON UN VOLUMEN DE AIRE EXTERNO (FRESCO) DE 1,5 MCS
Flujos de Aire	Aire de la Habitación (m <sup>3</sup> /s)	4,5	3,5	3,5
	Aire Fresco (m <sup>3</sup> /s)	0,5	1,5	1,5
	Mezcla de Aire (m <sup>3</sup> /s)	5	5	5
	Propiedades de la mezcla de Aire	297,93 K Temperatura Bulbo Seco 291,64 K Temperatura Bulbo Húmedo 68,09 KJ/Kg Entalpia	299,71 K Temperatura Bulbo Seco 292,71 K Temperatura Bulbo Húmedo 74,13 KJ/Kg Entalpia	297,71 K Temperatura Bulbo Seco 290,82 K Temperatura Bulbo Húmedo 67,39 KJ/Kg Entalpia
PROCESO PSICROMÉTRICO DEL AIRE EN EL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO.				
Diferencia Entálpica	$\Delta H = h_{ma} - h_s$	<b>16,96 KJ/Kg</b>	<b>23,0274 KJ/Kg</b>	<b>16,282 KJ/Kg</b>
Carga Total de Enfriamiento	$CTE = 1.13398 * q * \Delta H$	<b>96,1615 Kw</b>	<b>130,5630 Kw</b>	<b>92,3173 Kw</b>

Figura 2. 12: Ejemplo 2. Uso de Ruedas Entálpicas con Aumento de Volumen de Aire Fresco.

En el ejemplo uno (1), se muestra que al usar la rueda entálpica en un sistema de aire acondicionado, se produce una disminución de 38 KW aproximadamente en la energía que absorben los equipos, lo cual permite el reemplazo por equipos de menor capacidad, sin afectar la capacidad de enfriamiento del sistema (**Figura 2.11**).

En el segundo caso, ejemplo dos (2), se observa que, al triplicar el caudal de aire fresco, la cantidad de energía que absorbe el sistema de aire acondicionado, sin rueda entálpica, se incrementa en un 35% aproximadamente. Al triplicar la cantidad de aire fresco y utilizar rueda entálpica simultáneamente, la cantidad de energía absorbida por el equipo de aire acondicionado disminuye casi en un 30% (**Figura 2.12**), lo que demuestra que las ruedas entálpicas producen grandes beneficios en aplicaciones de ambientes que exigen grandes volúmenes de aire fresco.

### **2.2.2 La Rueda Disecante.**

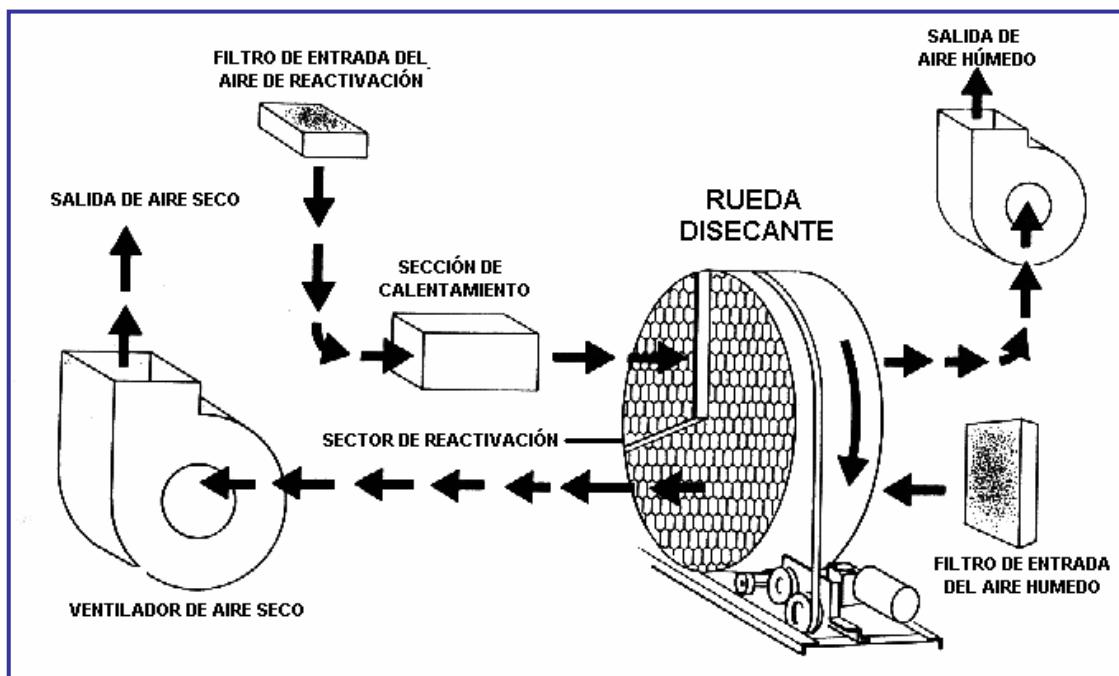
Las ruedas disecantes son deshumidificadores que se han utilizado desde la década de los años 70. El principio utilizado en la fabricación de este tipo de deshumidificador fue patentado por el Ingeniero Carl Munters, quien fue el inventor del sistema de refrigeración por adsorción.

Las ruedas disecantes pueden utilizarse tanto en la industria como en el control ambiental, entre otros usos. Algunas aplicaciones de tipo industrial son: almacenamiento en seco para preservar materiales en depósitos y cavas, procesos de trabajo con materiales sensibles al calor, sistemas de control de humedad independiente en aire acondicionado, etc.

#### **2.2.2.1 Descripción de la Rueda Disecante.**

La rueda disecante se conforma por los componentes listados a continuación, que se observan en la **Figura 2.13**.

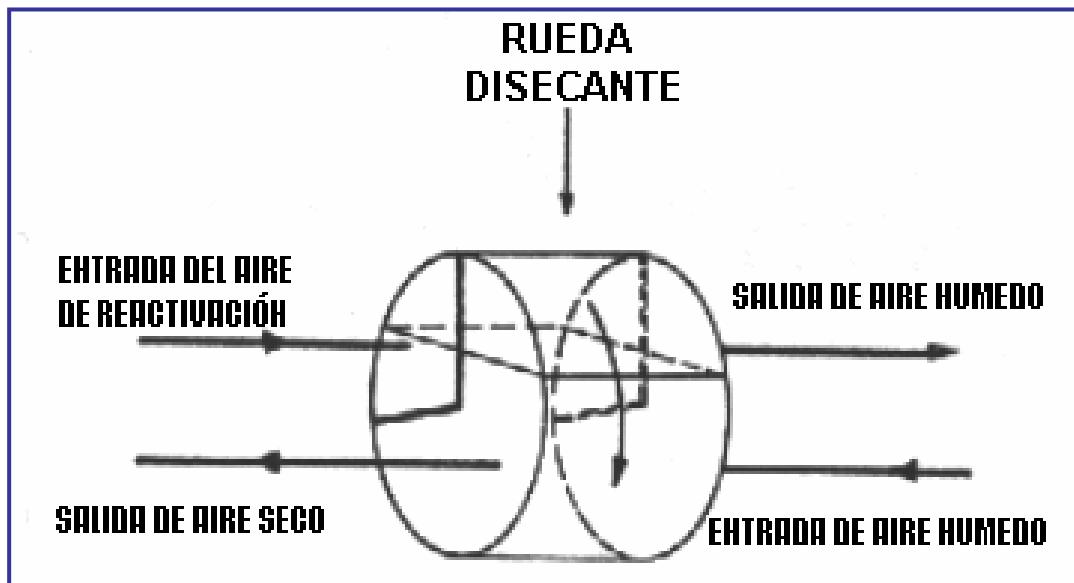
- Una rueda formada por finas láminas de asbesto, impregnadas con una solución de sal disecante; estas láminas se enrollan formando cilindros angostos o flautas, los cuales son colocadas perpendicularmente al diámetro de la rueda.
- Ventiladores de adsorción y reactivación.
- Calentador de reactivación.
- Un motor, que impulsa a la rueda disecante a través de una correa y le permite una rotación en un rango de velocidad comprendido entre 5 y 25 rpm.



**Figura 2.13:** Componentes de la Rueda Disecante.

Todos los componentes se encuentran dentro de la unidad de la rueda disecante. Los circuitos de recorrido de las corrientes de aire separan la superficie de la rueda en dos sectores, 75% del área forma un circuito de adsorción o deshumidificación y 25% del área forma un circuito de reactivación o humidificación, ambos perfectamente separados por canales longitudinales. La **Figura 2.14** muestra la disposición de ambos sectores de la rueda disecante.

Todos los componentes de la rueda disecante se ubican dentro de una caja cuadrada, cuyas dimensiones dependen del equipo seleccionado. En el **Apéndice C** se presenta una serie de modelos de ruedas disecantes, de la marca Cargocaire, con sus respectivas dimensiones.

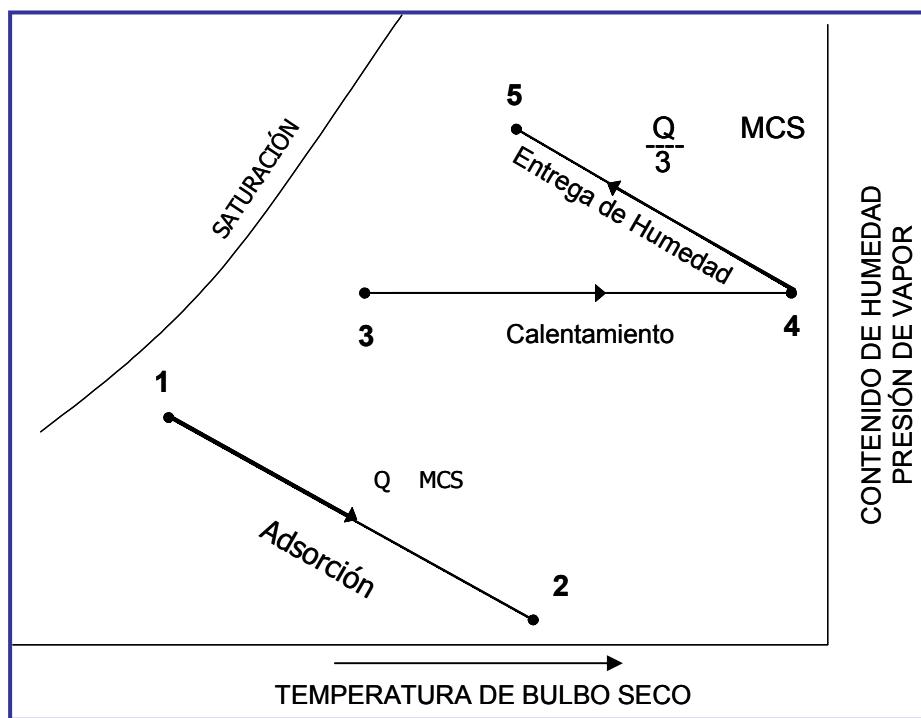


**Figura 2.14:** Sectores de la Rueda Disecante.

La rueda disecante, suspendida en una base sólida, se apoya sobre cojinetes rotatorios, que permiten el movimiento únicamente al ser impulsada por el motor.

#### 2.2.2.2 Funcionamiento de las Ruedas Disecantes.

La rueda disecante utiliza la humedad y temperatura de una corriente de aire de retorno para humedecer y enfriar la corriente de aire fresco a suministrar al ambiente o al equipo de ventilación. La **Figura 2.15** muestra, en una carta psicrométrica, los procesos a los cuales son sometidas las corrientes de aire, a su paso por la rueda disecante.



**Figura 2.15:** Variación de las Condiciones del Aire en la Rueda Disecante.

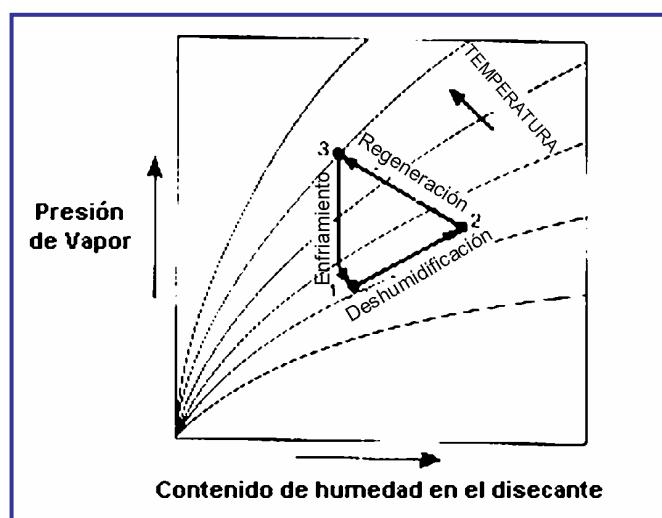
Como se puede apreciar en la **Figura 2.15**, el aire, al entrar a la rueda disecante, atraviesa en primer lugar el área de adsorción (punto 1), allí, el vapor de agua fluye hacia el asbesto y el disecante, debido a las fuerzas producidas por los diferenciales de presión de vapor existentes. La adsorción ocurre en los bordes de la sección transversal de las flautas al entrar en contacto directo con la corriente de aire circulante (trazo 1–2).

Paralelamente, en el sector de reactivación (trazo 3–4), la corriente de aire de reactivación es calentada, con el objetivo de disminuir su humedad relativa y obtener las condiciones adecuadas para el proceso de reactivación. Esta corriente de aire se hace pasar en dirección contraria al flujo de aire de adsorción, a través de los canales de la rueda, que a su vez, se mantienen girando lentamente; al pasar la corriente de aire caliente por los asbestos y el disecante (trazo 4 – 5), ésta adsorbe la humedad, que luego es desechada.

De esta manera, al disminuir el contenido de temperatura y humedad del aire a utilizar en el sistema de ventilación, se obtiene como resultado una mejor calidad de aire en el sistema de ventilación, sin los costos adicionales que implican sistemas de acondicionamiento de aire. Por otra parte, en sistemas de control independiente de humedad, se obtienen los niveles de humedad requeridos y el sistema de acondicionamiento de aire disminuye la cantidad de energía absorbida en su operación, lo cual produce ahorro energético y disminución de costos operativos.

También es importante señalar el comportamiento del material disecante presente en la rueda, el cual extrae, desde el aire, la humedad y luego la almacena; al calentarse el disecante, la humedad recolectada es manejada hacia una corriente de aire viciado.

La **Figura 2.16** muestra el proceso de deshumidificación que realiza el material disecante. La posición uno (1) constituye el contacto inicial entre el aire húmedo y el disecante, el cual al incrementar su carga de humedad, se mueve a la posición 2, donde se encuentra cerca de la saturación. El proceso desde la posición 2 a la 3 corresponde a la regeneración y sucede cuando se aplica calor para sacar la humedad acumulada. Por último el material disecante debe enfriarse, para asumir su rol de colector de humedad nuevamente.

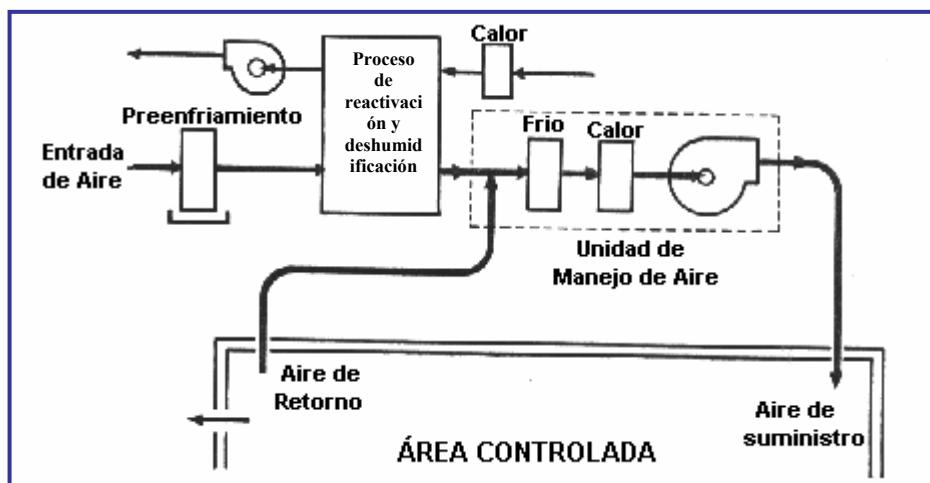


**Figura 2.16:** Comportamiento del Material Disecante durante el Proceso de Deshumidificación

### 2.2.2.3 Ubicación de las Ruedas Disecantes al aplicarlas como Equipos de Ahorro de Energía.

La rueda disecante puede ser instalada dentro o fuera del ambiente donde se desee tener el control de humedad. En caso de ubicarlas dentro del ambiente controlado, la entrada y salida del aire de reactivación deben ser conectadas con el exterior del ambiente controlado. En la **Figura 2.17** se muestra la ubicación del equipo de la rueda disecante fuera del ambiente controlado, en cuyo caso, deben tenerse las siguientes consideraciones:

- El aire de retorno del ambiente debe conectarse directamente a la entrada de aire húmedo de la rueda disecante.
- Deben colocarse ductos adicionales para el suministro de aire al ambiente controlado desde la rueda disecante.
- La salida del aire de reactivación debe conectarse directamente al exterior del edificio, y para prevenir la entrada de partículas extrañas, debe protegerse la descarga con un filtro de tela metálica.



**Figura 2.17:** Ubicación de la Rueda Disecante en un Sistema de Aire Acondicionado.

#### **2.2.2.4 Mantenimiento de las Ruedas Disecantes.**

El uso de ruedas disecantes requiere, cada dos (2) meses, el reemplazo de filtros de aire, lo cual debe hacerse con mayor frecuencia en áreas con gran cantidad de polvo.

Cada 6 meses, se requiere remover la unidad para inspección. En caso de presentar gran cantidad de polvo, se deben reemplazar los filtros y usar un limpiador de vacío industrial sobre la superficie de la caja y de la rueda.

#### **2.2.2.5 Ventajas del Uso de Ruedas Disecantes.**

- La unidad disecante permanece seca, no se produce condensación en ninguno de sus procesos; además, el material disecante previene el arrastre de partículas con el flujo de la corriente de aire.
- El contenido de humedad se mantiene constante en el aire, independientemente de las condiciones de entrada del aire..
- La carcaza de las ruedas disecantes, tiene paneles de acceso que permiten inspecciones visuales de las operaciones de manejo, cuando la unidad está en funcionamiento.

#### **2.2.2.6 Desventajas de Uso de Ruedas Disecantes.**

- El proceso de reactivación de aire exige un alto consumo de energía.
- Las ruedas disecantes requieren un gran espacio dentro de la sala de manejo de aire, debido a sus dimensiones, lo cual limita su aplicación en sistemas ya instalados.

#### **2.2.2.7 Criterios de Selección de Ruedas Disecantes.**

La selección de una rueda disecante se relaciona, directamente, con el nivel de control de la humedad y temperatura de diseño en el ambiente a acondicionar.

Las condiciones necesarias a tomar en consideración son las siguientes:

- Se deben mantener constante la temperatura y los niveles de humedad en el área a acondicionar.
- Se deben definir y cuantificar las cargas sensibles y las cargas latentes internas (las producidas en el espacio a acondicionar).
- Se debe caracterizar y definir los requerimientos de aire, para lo cual se debe indicar, al menos, la temperatura de bulbo seco del mismo.

### **2.2.3 Truncadores de Potencia Inteligentes.**

Los truncadores de potencia o conmutadores inteligentes son equipos electrónicos, capaces de disminuir el consumo de energía eléctrica en equipos que operan con motores de inducción, monofásica o trifásica, con la reducción de las pérdidas por magnetización, ya que impiden que sus niveles de consumo de energía sean excesivos, mediante una disminución en la tensión en los terminales del motor, desde el momento de arranque, gradualmente, hasta que el motor proporciona suficiente torque para acelerar la carga a velocidad nominal, y, haciendo corresponder el torque del motor con el torque de la carga, mediante la detección de la carga en el motor durante su operación.

#### **2.2.3.1 Descripción de los Truncadores de Potencia Inteligentes.**

Los truncadores de potencia inteligentes contienen los siguientes elementos:

- Dispositivos electrónicos de control, como los TRIAC, SCR, tiristores, incorporados en los circuitos de cada fase del motor, para controlar en forma precisa el nivel de tensión aplicado.
- Circuito de muestreo de tensión, que indica el paso por cero de la corriente y tensión alternas.

- Microcontrolador, que provee la señal digital de control al TRIAC, para controlar la energía suministrada al motor.
- Software o algoritmo de detección de la carga en el motor.

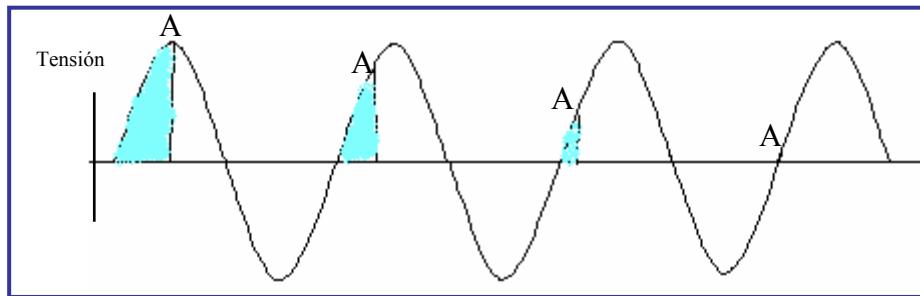
Las dimensiones de los truncadores de potencia inteligentes dependen de la aplicación a la cual estén destinados. Si los motores requieren corrientes de operación altas, las dimensiones de los truncadores de potencia también se incrementarán. En el **Apéndice D** se muestran las dimensiones de distintos modelos de truncadores de potencia inteligentes, de la marca Power Planner.

#### 2.2.3.2 Funcionamiento de los Truncadores de Potencia Inteligentes.

Los truncadores de potencia funcionan con un software o algoritmo de manejo de energía, que detecta la carga en el motor mediante la supervisión de los puntos de cruce por cero de la onda sinusoidal de tensión y corriente A.C. Al medir el tiempo entre estos puntos de cruce, determina el factor de potencia, el cual es supervisado durante cada ciclo, para luego, por medio del TRIAC o SCR, ajustar la tensión aplicada en cada período, para manejar en forma eficiente las variaciones de carga.

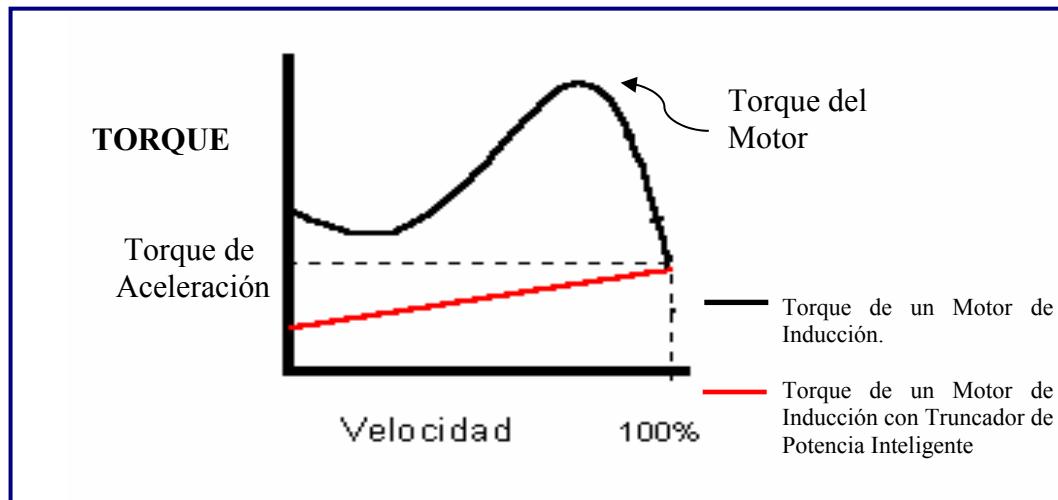
Un circuito de muestreo de la tensión aplicada al motor, provee la señal que indica cuando ésta cruza por cero, la cual es llevada a un microcontrolador, que emite una señal digital de control al TRIAC, para que éste a su vez regule la energía suministrada al motor, mediante la variación del ciclo de servicio de la potencia aplicada al bobinado del mismo.

El dispositivo de control permitirá el flujo de corriente al motor a partir del instante indicado por la señal proveniente del microcontrolador, como se puede apreciar en la **Figura 2.18**. Mientras más cercano se encuentra el punto “A” del final del ciclo, menor será la magnitud de corriente. Por medio de este principio, se ajusta continuamente la tensión en los terminales del motor, mediante un control preciso de los puntos “A”, lo cual proporciona sólo la tensión necesaria para que el motor acelere la carga.



**Figura 2.18:** Tensión Aplicada al Motor.

Por lo tanto, empezando con un retardo significativo del punto “A” en cada medio ciclo y reduciéndolo progresivamente a través de un tiempo establecido, la tensión aplicada al motor empieza con un valor relativamente bajo y se incrementa hasta su valor nominal. Debido a que el torque del motor es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada, el torque de aceleración (o de arranque) se incrementa de manera gradual asegurando un arranque suave tanto para el motor como para la carga que maneja, tal como se muestra en la **Figura 2.19**.

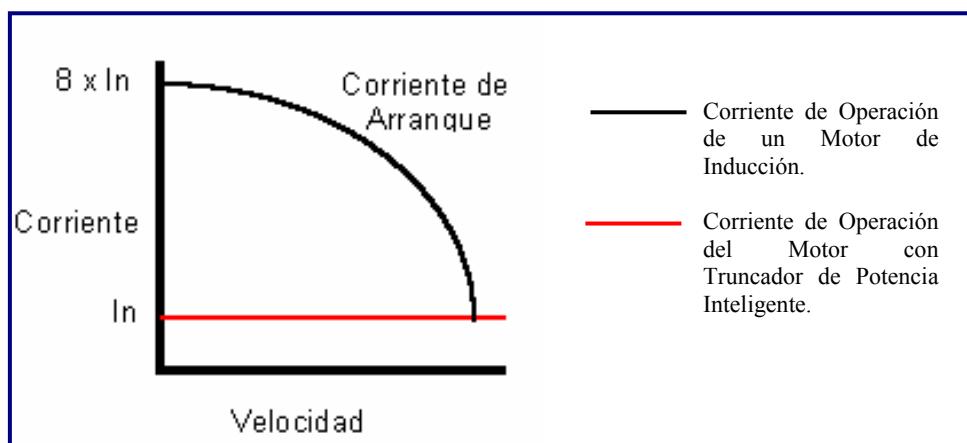


**Figura 2.19:** Curva Torque vs. Velocidad de un Motor de Inducción.

El ahorro de energía se obtiene, por una parte, al disminuir el consumo de energía eléctrica (KWh) durante el arranque del motor, pues el truncador de potencia inteligente evita corrientes de magnetización en exceso, y por otra parte, se reduce la demanda del

sistema, es decir, la potencia reactiva (KVA), debido a que corrige el factor de potencia del motor.

En la **Figura 2.20** se observa la curva corriente vs. velocidad de un motor de inducción al utilizar un truncador de potencia inteligente.



**Figura 2.20:** Curva Corriente vs. Velocidad en un Motor de Inducción.

### 2.2.3.3 Ubicación de los Truncadores de Potencia Inteligentes al ser utilizados con Motores.

Los truncadores de potencia inteligentes se deben ubicar lo más cercano posible al motor seleccionado (a una distancia no mayor a 10 metros del mismo). Se pueden instalar en una pared o en un pedestal. Existen dos formas de conectar los truncadores de potencia:

- Entre el arrancador y el motor, cuando el arrancador / contactor es del tipo directo.
- Antes del arrancador, cuando el arrancador / contactor es del tipo estrella / delta.

La salida del truncador de potencia se conecta siempre directamente al motor o al arrancador estrella / delta, que a su vez se conecta directamente al motor. No debe

conectarse más de un motor a la salida, ni cualquier otro componente, tales como transformadores o ventiladores.

#### **2.2.3.4 Mantenimiento.**

Los truncadores de potencia inteligentes no contienen componentes mecánicos que requieran mantenimiento periódico para su funcionamiento.

#### **2.2.3.5 Ventajas.**

- El truncador de potencia inteligente produce un arranque suave del motor, lo que permite una aceleración gradual, minimizando el esfuerzo mecánico en el motor y en los componentes acoplados al mismo durante el arranque, así como, una reducción en el consumo de electricidad.
- Reduce las pérdidas en el hierro y cobre del motor, debido a la disminución en la tensión y corriente de operación del motor.
- Reduce el calor disipado y la vibración en el motor, por lo que le prolonga su vida útil.
- Reduce caídas de voltaje en el arranque, mejorando la operación del motor y disminuyendo riesgo de daños a los equipos asociados.
- Reduce el consumo de electricidad en operación normal, contribuyendo a minimizar apagones y sobre tensiones.
- Ahorro en el consumo de energía eléctrica (KWh) durante el arranque y operación del motor.
- Reduce el cargo por demanda asignada (KVA)
- Se reduce la frecuencia de mantenimientos preventivos y correctivos a los motores y equipos asociados.

- No requiere de mantenimiento.

#### **2.2.3.6 Desventajas.**

- Generan armónicos en la red.
- No cubren toda la gama de potencia de motores de inducción.
- Por ser un equipo de última tecnología, el usuario no se arriesga a utilizarlo por inercia tecnológica.

#### **2.2.3.7 Criterios de Selección.**

Los criterios para seleccionar truncadores de potencia inteligente a fin de obtener mayores probabilidades de ahorro de energía, son los siguientes:

- La carga del motor, donde se desea utilizar el truncador de potencia inteligente, debe ser variable durante su ciclo de operación, preferiblemente con un promedio de carga de 60%, o el motor debe estar sobredimensionado para el trabajo.
- La velocidad del motor debe ser constante.
- El motor debe estar operando por lo menos 8 horas al día.

Si se cumplen los tres criterios, a fin de dimensionar el truncador de potencia inteligente, se deben obtener, por medio de mediciones, con un registrador de datos, durante uno o más ciclos de operación, los siguientes parámetros:

- Corriente de operación a máxima carga del motor (FLA / RLA).
- Corriente de arranque del motor (LRA) .
- Tensión de operación del motor.

Es importante identificar situaciones anormales en la operación del motor, que deben ser corregidas antes de instalar el truncador de potencia inteligente, tales como las siguientes:

- Fluctuación en la acometida eléctrica mayor de +/- 5%.
- Voltaje de operación menor al indicado en la placa.
- Corriente de operación mayor al indicado en la placa.
- Corriente de arranque mayor al indicado en la placa.

#### **2.2.4 Convertidor de Frecuencia.**

Los convertidores de frecuencia son rectificadores de la tensión alterna de alimentación, que llevan luego esta tensión continua rectificada a alterna, de amplitud y frecuencia variables<sup>5</sup>. Se utilizan con motores asincrónicos trifásicos estándar, con el fin de regular su velocidad y en consecuencia, variar las condiciones del proceso de operación del motor.

Los convertidores de frecuencia son capaces de establecer el voltaje de arranque, la compensación de arranque y la compensación de deslizamiento de un motor, automáticamente, basándose en la tensión, corriente, frecuencia y potencia nominales del mismo. En la **Figura 2.21** se aprecia un modelo de convertidor de frecuencia.

Por el hecho de que el convertidor de frecuencia produce una compensación de arranque, es decir, elimina los picos de corriente en el arranque del motor, así como también proporciona valores óptimos de corriente y voltaje para cada punto de operación, se logra una corrección del factor de potencia del motor, a la vez que se mejora su eficiencia, lo cual también se traduce en ahorro de energía, al disminuir la demanda o potencia reactiva (KVa) del sistema.



**Figura 2.21:** Convertidor de frecuencia (serie Altivar)

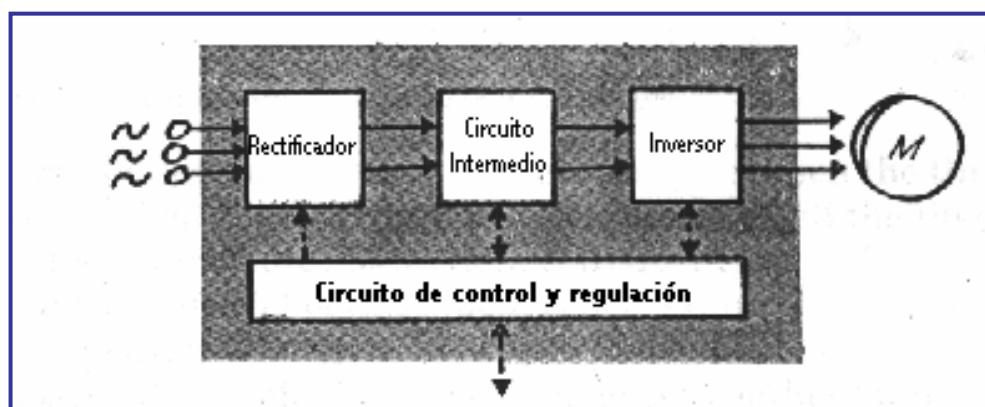
Los convertidores de frecuencia ofrecen grandes ventajas, tales como el control de energía para regular sistemas de ventiladores y bombas, debido a que aprovechan las leyes de proporcionalidad de estos sistemas para obtener un gran ahorro de energía eléctrica y por ende, considerables disminuciones de costos de operación.

El efecto de ahorro de energía que se obtiene al implementar un convertidor de frecuencia, en bombas y ventiladores, radica en el hecho de poder regular la velocidad de rotación de estas máquinas, para suministrar un flujo de operación y potencia acorde con los requerimientos de carga del sistema, con lo cual, se consigue una disminución en el consumo de energía eléctrica (KWh) del sistema, tal como se muestra en el ejemplo de la sección 3.2.4.8.

#### **2.2.4.1 Descripción de los Convertidores de Frecuencia.**

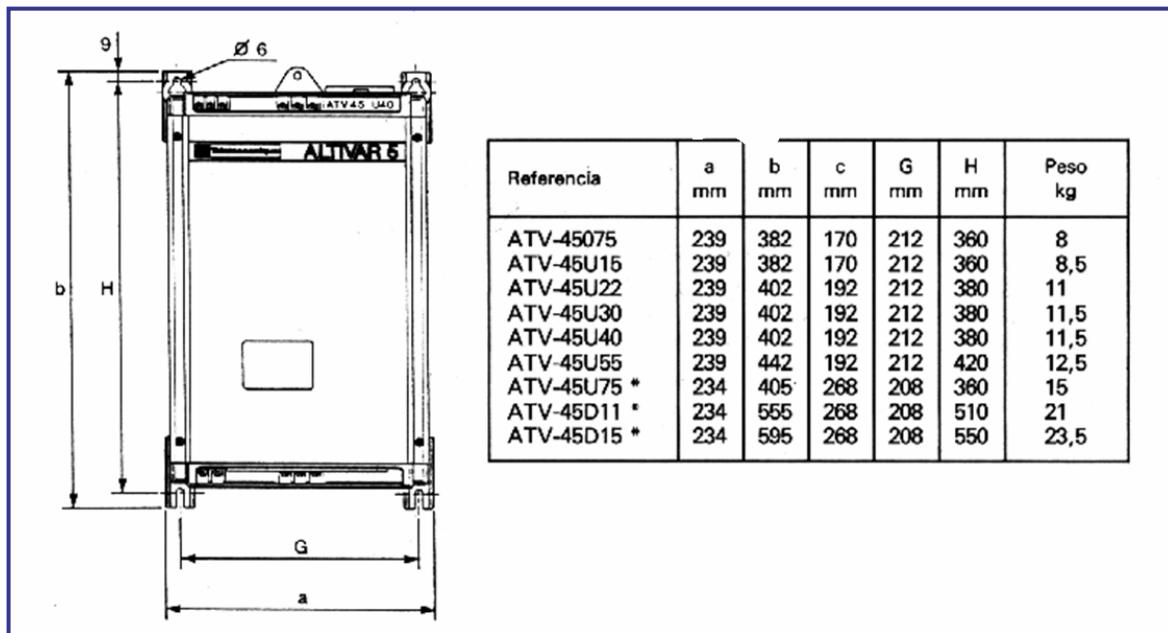
Las partes fundamentales de un convertidor de frecuencia se encuentran esquematizadas en la **Figura 2.22** y son las siguientes:

- Rectificador, el cual tiene la función de generar una tensión continua a partir de una fuente de alimentación alterna trifásica; su circuito base es un puente trifásico mixto, compuesto por tiristores y diodos, controlado por medio de un dispositivo de regulación, con el objeto de suministrar una salida de tensión regulada, en función de las necesidades de la carga. Existen distintos tipos, tales como: el rectificador no controlado, constituido por diodos, el rectificador controlado de onda completa, constituido por tiristores y rectificadores compuestos por transistores.
- Circuito intermedio, consta de un circuito LC, cuya función principal es el suavizado del rizado de la tensión rectificada y reducción de la emisión de armónicos hacia la red.
- Inversor, que convierte la tensión continua del circuito intermedio en una señal de tensión y frecuencia variable, mediante la generación de pulsos.
- Circuito de control, maneja el control de semiconductores del convertidor, a la vez que recibe y transmite señales desde el convertidor de frecuencia a los otros equipos, las cuales provienen de un panel de control o de un control de PLC. Además, realiza funciones de supervisión de funcionamiento del motor, monitoreando corriente, voltaje, temperatura, etc.



**Figura 2.22:** Elementos de un Convertidor de Frecuencia

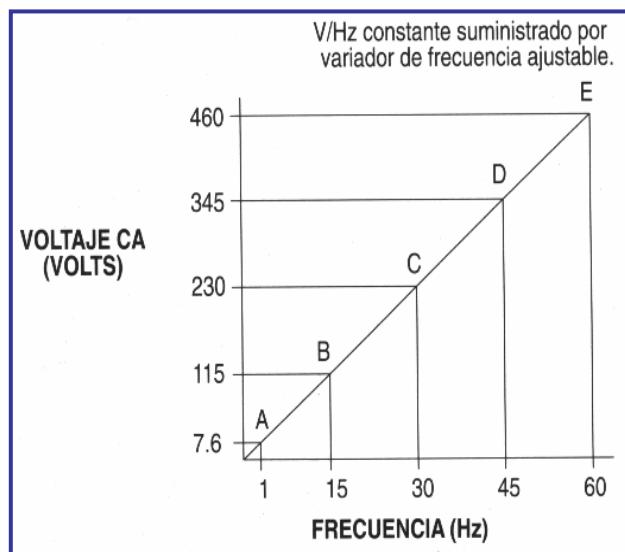
Las dimensiones de los convertidores de frecuencia se definen por la caja que contiene las partes anteriormente descritas. Las dimensiones de esta caja dependen del fabricante. La **Figura 2.23** muestra las dimensiones de un convertidor de frecuencia de la serie Altivar, de Telemecanique. En el **Apéndice E**, se encuentran las dimensiones de convertidores de frecuencia de diferentes fabricantes.



**Figura 2.23:** Convertidor de Frecuencia Serie Altivar Telemecanique.

#### 2.2.4.2 Funcionamiento del Convertidor de Frecuencia.

El principio de funcionamiento de los convertidores de frecuencia se basa en mantener constante la relación característica tensión/frecuencia (V/Hz) propia del motor, por lo cual, el convertidor de frecuencia varía voltaje y frecuencia en la misma proporción. La **Figura 2.24** ilustra esta relación de un motor utilizando un convertidor a distintas frecuencias.



**Figura 2.24:** Relación Tensión/Frecuencia (V/Hz) suministrado por un Convertidor de Frecuencia.

El efecto de mantener la relación V/Hz constante evita los problemas que se obtienen al variar sólo la frecuencia o sólo la tensión. Al variar la frecuencia y mantener constante la tensión, la variación de corriente mantiene una relación inversa a la variación de frecuencia, por lo tanto, si la frecuencia se reduce, la corriente del estator aumenta y se produce sobrecalentamiento del motor; en caso de aumentar la frecuencia, la corriente disminuye y el par se ve afectado. En caso de variar sólo la tensión, se afecta directamente el par, ya que éste varía por el cuadrado de la tensión aplicada, de acuerdo a la ecuación 3.xx. Por lo tanto, una variación en la tensión puede producir un par de arranque inadecuado, un par pico reducido, etc.

$$T = K_t * E^2$$

**Ecuación 2.4**

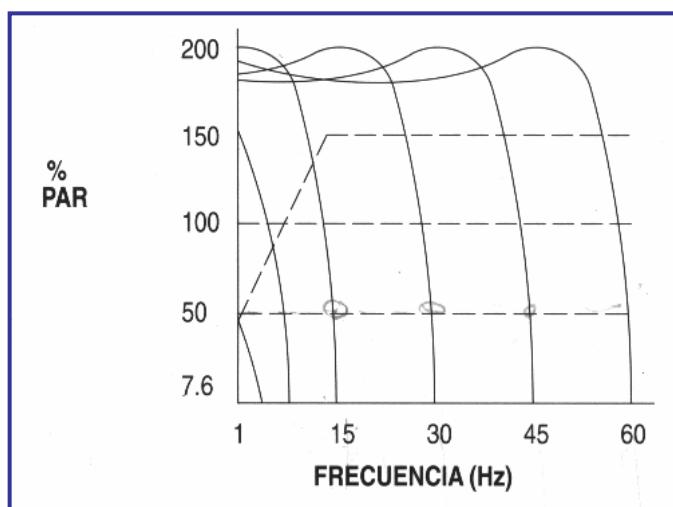
Donde:

T: par a cualquier deslizamiento

$K_t$ : una constante del par

E: voltaje aplicado a los bobinados del estator.

En la **Figura 2.25**, se observa el par de un motor Vs frecuencia, a una relación constante V/Hz de 7,6, lo cual asegura un par correcto desde 15 hasta 60 Hz. Por debajo de 15 Hz, entre los puntos A y B, un suministro de V/Hz constante no produce un par adecuado; la explicación de esto es que a frecuencias muy bajas, el voltaje es insuficiente para excitar el motor y producir par, por lo tanto, para solventar esta situación, el convertidor de frecuencia varía la relación V/Hz y realiza un refuerzo de voltaje a baja velocidad.



**Figura 2.25:** Par del Motor Bajo el Efecto de Variación de Frecuencia.

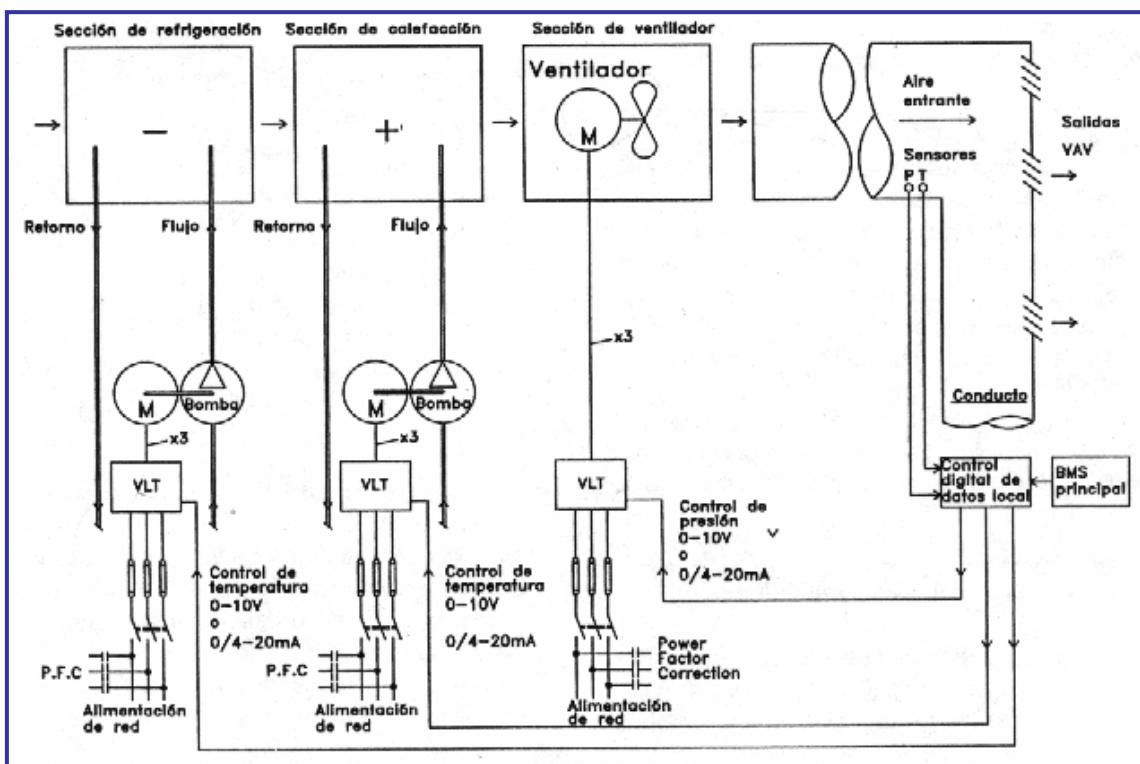
Los convertidores de frecuencia varían la frecuencia en dos etapas de funcionamiento: una primera etapa rectificadora, que transforma corriente alterna en continua, y otra inversora, que transforma corriente continua en alterna, con frecuencia y tensión dependientes de la carga impuesta por el sistema. De esta forma, se consigue una tensión variable en los terminales del motor y, éste se habilita para ser arrancado y operado de forma eficiente a diferentes velocidades.

En la primera etapa, el rectificador convierte las 3 fases A.C. de tensión de suministro principal a una tensión rectificada D.C, la cual, antes de llegar al inversor, pasa a través del circuito intermedio, que se encarga de corregir el rizado proveniente del rectificador. El principio de control del inversor se puede basar en:

- Modulación de Amplitud de Pulso (PAM), donde el patrón de conmutación es controlado por la amplitud de la tensión o corriente del circuito intermedio, y el controlador hace que la frecuencia siga la amplitud de la tensión.
- Modulación de Ancho de Pulso (PWM), donde se aplica una tensión fija, y la frecuencia es controlada por pulsos positivos, aplicados en medio período y pulsos negativos en el siguiente medio período, a la vez que se varía el ancho de pulso del voltaje.
- Control de vector tensión (VVC).
- Control directo de par o de torque (DTC).
- Control de flujo de corriente (FCC).

#### **2.2.4.3 Ubicación de los Convertidores de Frecuencia en Sistemas de Aire Acondicionado.**

Los convertidores de frecuencia deben ubicarse en el área próxima al equipo que se desee regular. En el caso del sistema de aire acondicionado se ubican en la sección de las UMA y Chillers. La disposición de los convertidores de frecuencia en el área de las UMA se observa en la **Figura 2.26**.



**Figura 2.26:** Convertidores de Frecuencia en un Sistema de Aire Acondicionado.

#### 2.2.4.4 Mantenimiento de los Convertidores de Frecuencia.

Los convertidores de frecuencia se componen sólo de partes electrónicas y de control, con requerimientos de mantenimiento autodiagnóstico, que indican las rutinas a seguir.

#### 2.2.4.5. Ventajas.

- La función de regulación de flujo o presión se realiza con mayor precisión, lo cual contrasta con los sistemas de regulación mecánica tradicionales.
- Disminuyen el nivel de ruido en los equipos al disminuir su velocidad.
- La instalación de un convertidor de frecuencia es muy sencilla, no necesita gran parte de los equipos eléctricos y mecánicos necesarios en un sistema mecánico de válvulas para regulación.

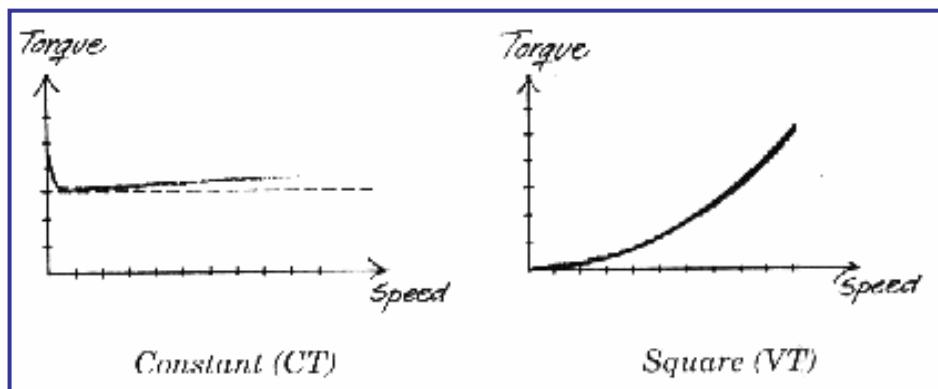
- Proporciona la corrección del factor de potencia para el motor
- No consume más tensión que la nominal.
- Ofrecen un ahorro de energía en el orden del 70%.
- El mantenimiento requerido es de autodiagnóstico.

#### 2.2.4.6. Desventajas.

- Propagan armónicos en la red, que perturban y pueden afectar el buen funcionamiento de los equipos instalados en la misma línea.
- La generación de armónicos puede afectar directamente el par del motor e incrementar las pérdidas.
- En algunos casos, generan altos picos de voltaje, los cuales son potencialmente perjudiciales para el motor.
- Se generan problemas de resonancia al instalar filtros para evitar el efecto producido por los armónicos.
- Produce alteraciones en el rango de velocidades de operación y daña los aislantes, en motores cuyo tiempo de operación supere los cuatro (4) años.

#### 2.2.4.7. Criterios de Selección.

Para seleccionar un convertidor de frecuencia es necesario conocer las características de carga del motor donde se desea implementar. El convertidor de frecuencia debe entregar la potencia de salida correcta, la cual puede calcularse de tres (3) maneras distintas. El método a aplicar depende de la cantidad de datos disponibles del motor. La carga característica puede ser constante o variable, según una relación cuadrática entre el torque y la velocidad, ilustrada en la **figura 2.27**.



**Figura 2.27:** Carga Característica de un Motor Asíncrono.

En un motor controlado por un convertidor de frecuencia deben considerarse, dentro de las características de torque, las siguientes condiciones:

- Cuando la velocidad de la bomba o ventilador aumenta, la potencia requerida aumenta según el cubo de la velocidad, por consiguiente, la velocidad de las bombas y ventiladores no deben exceder la velocidad síncrona del motor.
- El rango de trabajo normal de bombas y ventiladores es de 30 – 80% de carga máxima. El grado de carga es aproximadamente proporcional a la velocidad.

Si la carga de torque es constante, el torque entregado por el motor debe ser mayor a la carga. El torque extra es usado para aceleración.

Una vez determinadas las características de la carga, la selección de las dimensiones del convertidor de frecuencia puede hacerse según los siguientes parámetros:

- Corriente de entrada del motor  $I_M$ . Es la forma más rápida y precisa para seleccionar un convertidor de frecuencia. Si el motor no está a máxima carga, la corriente puede determinarse basándose en mediciones en plantas que se encuentren operando.

Ejemplo:

Para un motor de características: 7,5 Kw., trifásico, de 380 V y corriente de entrada 15,5 A; se escoge un convertidor de frecuencia cuya corriente de salida máxima,  $I_{VLT}$ , sea mayor o igual a 15,5 A, con torque constante o variable.

- Potencia de salida  $S_M$  del motor y potencia de salida  $S_{VLT}$  del convertidor de frecuencia.

Ejemplo:

Para un motor con las mismas características del ejemplo anterior, la potencia de salida  $S_M$  viene dada por la ecuación:

$$S_M = \frac{U * I * \sqrt{3}}{1000} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde:

$S_w$  = Potencia de Salida.

$U$  = Tensión

$I$  = Corriente

De allí se tiene,  $S_M = 10,2$  KVA, por lo cual, se escoge un convertidor de frecuencia cuya salida máxima  $S_{VLT}$  sea mayor o igual a 10,2 KVA., con torque constante o variable.

- Potencia de salida del motor  $S_M$ , tomando en consideración el factor de potencia y eficiencia del motor. Debido a que el factor de potencia y la eficiencia del motor varían dependiendo de la carga, este método es menos preciso que el anterior.

Ejemplo:

Para un motor de características:  $P = 3$  Kw., eficiencia  $\eta = 0,80$  y factor de potencia ( $\cos \phi$ ) = 0,81, se tiene de la ecuación 3.11:

$$S_M = \frac{P}{\eta * \cos \varphi}$$

**Ecuación 2.6**

Donde:

P = Potencia

 $\eta$  = Eficiencia del motor. $\cos\varphi$  = Factor de Potencia.

$S_M = 4,6$ , por lo cual, se escoge un convertidor de frecuencia cuya salida máxima,  $S_{VLT}$ , sea mayor o igual a 4,6 KVA, con torque constante o variable.

Al seleccionar un variador de frecuencia se debe considerar el rango de velocidad, el cual es la relación entre la máxima y la mínima velocidad requerida por la unidad a ser manejada y se determina según su aplicación. Utilizar un convertidor de frecuencia a una velocidad fuera de su rango de operación normal, reduce la precisión. Por consiguiente, el convertidor debe tener un rango de velocidad mayor al requerido por la aplicación.

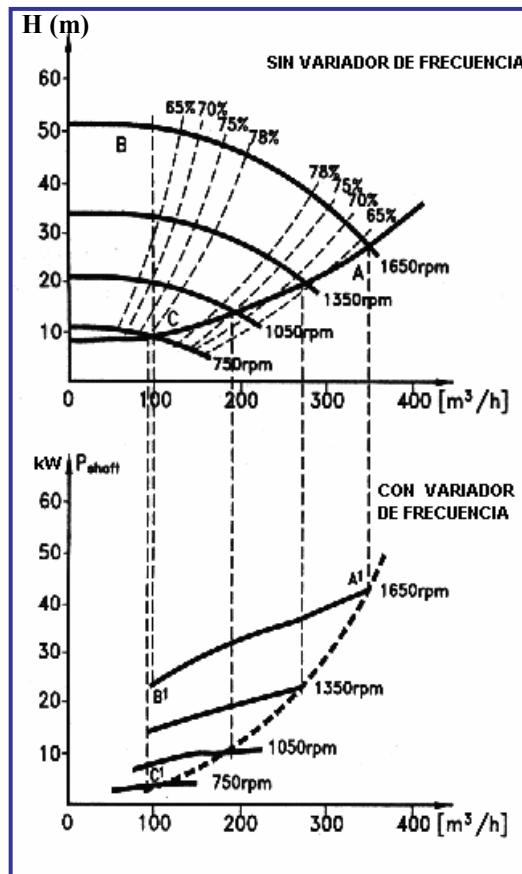
#### **2.2.4.8 Ejemplos del Funcionamiento de Sistemas de Aire Acondicionado con Convertidor de Frecuencia.**

Como primer ejemplo se muestra el caso de una bomba de agua helada con potencia de 45 KW, que forma parte de un sistema de aire acondicionado. La **Tabla 2.2**, presenta las horas de funcionamiento de la bomba, su caudal de operación y el consumo de energía.

**Tabla 2.2:** Ejemplo 1, Datos Característicos.

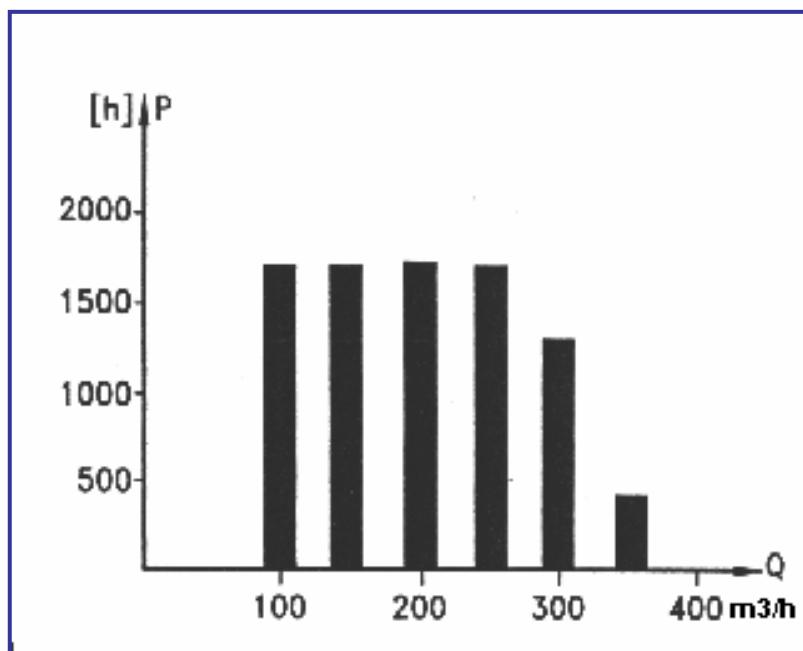
MCH	Distribución		Regulación por Válvula		Control por Convertidor de Frecuencia	
	%	Horas	Potencia A1 - B1	Consumo KWh	Potencia A1 - C1	Consumo KWh
350	5	438	42,5	18,615	42,5	18,615
300	15	1314	38,5	50,589	29,0	38,106
250	20	1752	35,0	61,32	18,5	32,412
200	20	1752	31,5	55,188	10,0	17,52
150	20	1752	28,0	49,056	6,5	11,388
100	20	1752	23,0	40,296	3,5	6,132
$\Sigma$	100	8760		275,064		

La **Figura 2.28**, muestra las curvas características de la bomba utilizada en este ejemplo. En ésta, se compara la regulación de flujo, por medio de válvulas sin control de la velocidad, y con el uso de un convertidor de frecuencia. Allí, se observa que sin control de velocidad, la bomba opera a una velocidad fija de 1650 rpm, a pesar de manejar caudales bajos, lo cual eleva el consumo de energía por parte de la bomba. Esto contrasta con el desempeño de la bomba al implementar el control por variador de frecuencia, en el que la velocidad de la bomba se ajusta a los requerimientos del caudal.



**Figura 2.28:** Curvas Características de la bomba.

En la **Figura 2.29**, se puede observar que el sistema requiere caudales entre 100 y 300  $\text{m}^3/\text{h}$  durante el 90% del tiempo de operación de las bombas, lo cual evidencia el desaprovechamiento de la energía al mantener la bomba operando a una velocidad de 1650 rpm durante todo el año, como lo imponen los sistemas de válvulas mecánicas. El resultado obtenido al implementar un convertidor de frecuencia, en este caso, es un ahorro superior al 50%, con la distribución de flujo dada para un año, correspondiente a 8760 horas; el período de amortización dependerá del precio por KWh y de los costos del convertidor de frecuencia.



**Figura 2.29:** Relación entre Caudal y Tiempo de Operación de la Bomba (Ejemplo 1).

Es importante destacar la simplicidad que se obtiene al instalar un convertidor de frecuencia, ya que se eliminan los arrancadores de las bombas y los sistemas de válvulas, mientras se obtiene un sistema sencillo que no requiere espacio físico adicional (**Figura 2.30**).

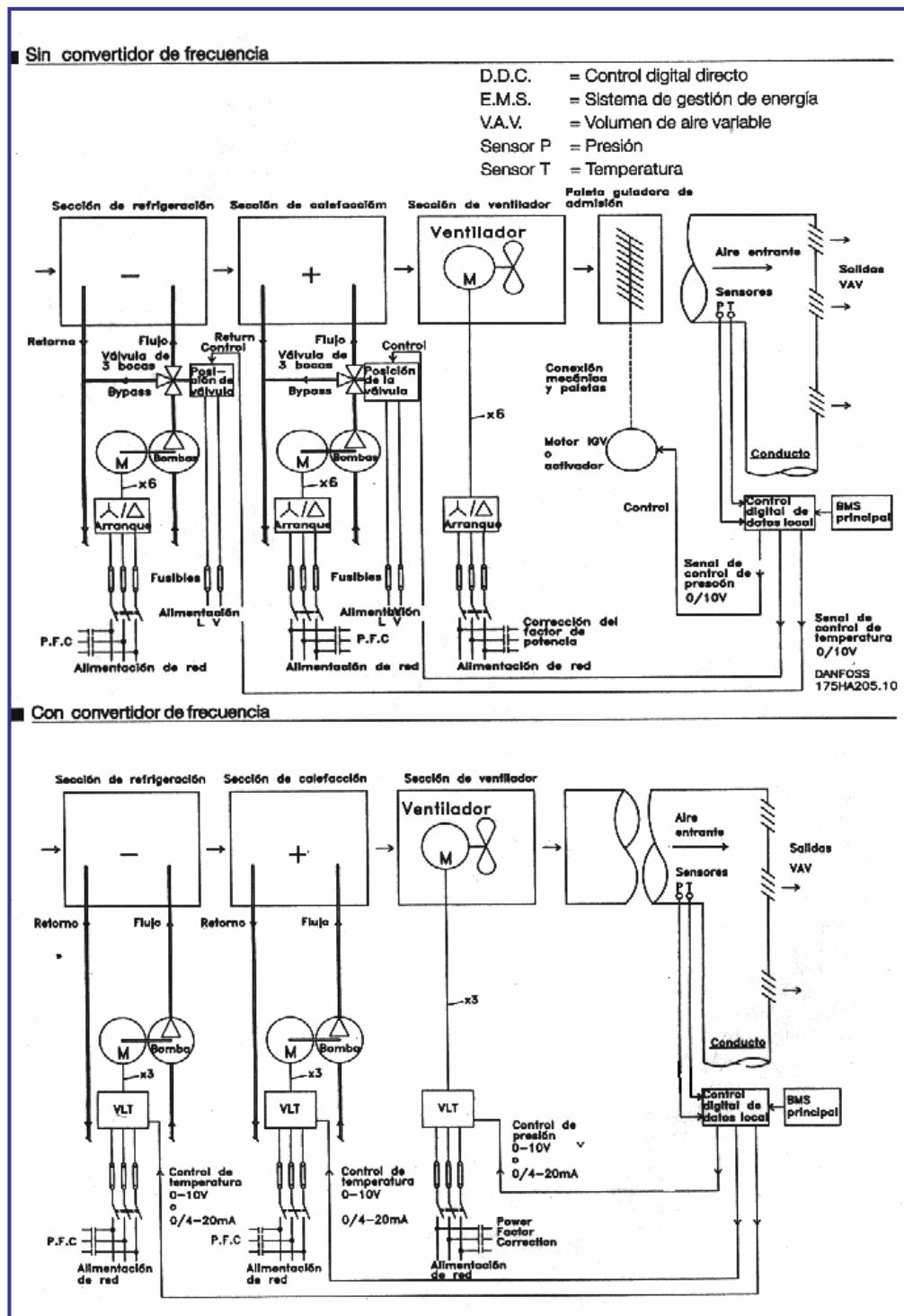


Figura 2.30: Ejemplo de un Sistema de Aire Acondicionado con Convertidor de Frecuencia.

Como segundo ejemplo, se muestran los efectos de la instalación de un convertidor de frecuencia de 25 hp en una bomba de agua helada, en un sistema de bombeo conformado por 2 bombas centrífugas, impulsadas por motores de 3500,50 rpm de velocidad y descarga conectada en paralelo.

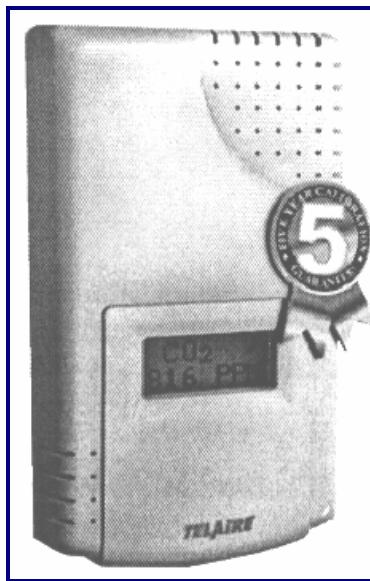
Las horas de funcionamiento de la bomba, antes de instalarse los variadores de frecuencia, eran de 38 horas a la semana, de las cuales, una bomba trabajaba 24 horas del día continuas y la otra, 14 horas. La bomba que trabajaba en arranque – paro se controlaba de modo manual. Esto provoca que en determinados momentos, cuando la temperatura ambiente es fría, como en la madrugada, o cuando la ocupación es baja, las bombas trabajen innecesariamente, pues el caudal de agua helada necesario para acondicionar el edificio es menor al suministrado y la presión en las tuberías aumenta.

Se determina que se pueden conseguir ahorros sustanciales al implementar un convertidor de frecuencia en una de las bombas, dejando la otra como auxiliar. La bomba de velocidad variable, oscila entre 75% y 100% de la velocidad nominal y el promedio de trabajo de la bomba auxiliar disminuye de 14 a únicamente 5 horas al día.

### **2.2.5 Sensores de CO<sub>2</sub>.**

Los sensores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), están diseñados para monitorear los niveles de CO<sub>2</sub> en el aire, interactuando con un damper para controlar la ventilación y asegurar los niveles adecuados de salida del aire en un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), para asegurar una óptima calidad de aire interior.

Utilizar CO<sub>2</sub> como indicador de ocupación, permite basar la ventilación en la ocupación actual del lugar, coincidiendo a la vez con la tasa de ventilación recomendada por American Society Of Heating, Refigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), con lo cual se logra disminuir la sobreventilación, ahorros de energía de hasta 30% y se optimiza la calidad de aire interior. En la **Figura 2.31** se muestra un sensor de CO<sub>2</sub>, de marca Telaire.



**Figura 2.31:** Sensor de CO<sub>2</sub>

La principal aplicación de los sensores de CO<sub>2</sub> es en sistemas de ventilación, y en segunda instancia, en sistemas de aire acondicionado, donde están asociados al uso de convertidores de frecuencia para regular la velocidad de los ventiladores.

Los sensores de CO<sub>2</sub> se utilizan para controlar sistemas de ventilación de ambientes cuya ocupación varía frecuentemente y donde se necesite asegurar que no haya exceso de suministro de aire fresco para evitar un mal aprovechamiento de la energía.

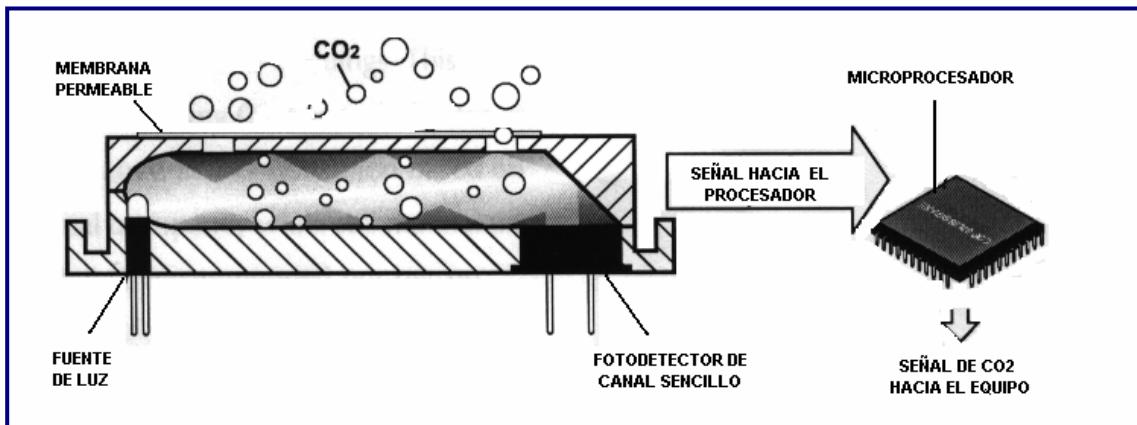
#### **2.2.5.1 Descripción de los Sensores de CO<sub>2</sub>.**

Los sensores de CO<sub>2</sub> que se utilizan en la actualidad son de tipo infrarrojo. Este tipo de sensor está constituido por una cámara de muestra, la cual contiene: una membrana de gas permeable, una fuente de luz infrarroja, un filtro óptico sintonizado a la frecuencia de absorción del dióxido de carbono y un foto-detector.

También poseen un sistema mecánico que se encarga de alternar rápidamente entre la fuente de luz y el foto-detector, si el sensor dispone de varios filtros ópticos, para medir varios gases de forma simultánea.

Además de esto, el sensor contiene un microprocesador y sistemas de control, que transmiten la señal a los equipos de ventilación y aire acondicionado.

La **Figura 2.32** muestra de manera esquemática los componentes de un sensor de CO<sub>2</sub>.



**Figura 2.32:** Componentes de un Sensor de CO<sub>2</sub>

Las dimensiones externas de los sensores de CO<sub>2</sub> están dadas por la carcasa. En el **Apéndice F** se muestran las dimensiones de sensores de CO<sub>2</sub> de distintas marcas de fabricantes.

### 2.2.5.2 Funcionamiento de los Sensores de CO<sub>2</sub>.

Los sensores de CO<sub>2</sub> pueden detectar el gas, basándose en el hecho de que la absorción de los gases ocurre a longitudes específicas de onda del espectro infrarrojo.

El gas, se difunde en la membrana de gas permeable que se encuentra dentro de la cámara de muestra, la cual permite el paso libre de las moléculas de gas pero previene la entrada de partículas.

En el extremo final de la cámara se encuentra una fuente de luz infrarroja. Parte de la luz producida por esta fuente rebota con las paredes de la cámara, pero a pequeñas distancias se logra gran efectividad. En el otro extremo del sensor se encuentra un filtro óptico especial, instalado sobre el detector de luz, el cual está diseñado para admitir solo luz a la longitud de onda donde el CO<sub>2</sub> es absorbido en la luz infrarroja. Cuando se

produce un pequeño cambio en la intensidad de luz, causado por la variación de la concentración de CO<sub>2</sub>, éste es medido con el detector de luz y se procesa, dentro del medidor de CO<sub>2</sub>, por un microprocesador, que envía una señal a un sistema de control que determina si se deben modificar las condiciones de operación de los equipos de ventilación o aire acondicionado en función de un aumento o disminución de las rutas de ventilación

#### **2.2.5.3 Mantenimiento de los Sensores de CO<sub>2</sub>.**

Los fabricantes recomiendan una calibración mensual, procedimiento sencillo que no requiere personal especializado.

#### **2.2.5.4 Ventajas de Uso de los Sensores de CO<sub>2</sub>.**

- El diseño es compacto, liviano y de fácil transporte e instalación.
- Además de dióxido de carbono, monitorea las concentraciones de químicos orgánicos, temperatura, humedad y partículas extrañas.
- El sistema de autocalibración, con elementos infrarrojos sensible al CO<sub>2</sub>, elimina la necesidad de calibración manual en muchas aplicaciones y permite un ajuste a la concentración de CO<sub>2</sub> deseada.
- Garantiza por lo menos 5 años de vida útil.
- Montaje externo que provee facilidad para realizar el mantenimiento.
- Sus pequeñas dimensiones exigen poco espacio para su montaje.
- Su atractivo perfil permite adecuarlo a la decoración del edificio.

#### **2.2.5.5 Desventajas de Uso de los Sensores de CO<sub>2</sub>.**

- Por no considerar las variables de temperatura y humedad en los ambientes a controlar, no garantiza condiciones de confort a sus usuarios.

- En sistemas de aire acondicionado presenta elevados costos adicionales, por la necesidad de incorporar convertidores de frecuencia y/o sistemas de control para los ventiladores del sistema.

#### **2.2.5.6 Criterios de Selección de los Sensores de CO<sub>2</sub>.**

El criterio fundamental que debe considerarse al escoger un sensor de CO<sub>2</sub> es el rango en ppm de CO<sub>2</sub> a medir en el ambiente; esto depende del nivel de ocupación y de las actividades que se realicen en el ambiente seleccionado, las cuales definen la tasa de ventilación mínima que debe cumplirse según recomendaciones de ASHRAE. En el **Apéndice G** se muestran las tasas de ventilación recomendadas por ASHRAE para distintos ambientes.

### **III. EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA DEPENDENCIA DE LA C.A. METRO DE CARACAS.**

Actualmente, en la C.A. Metro de Caracas, se está desarrollando e implantando un plan maestro para el ahorro de energía, en el cual una de sus facetas, es la factibilidad de aplicación de nuevas tecnologías hacia el área de iluminación y servicios auxiliares. Para la aplicación de estas nuevas tecnologías, se deben realizar evaluaciones del consumo de energía eléctrica en sus diferentes dependencias mediante la aplicación de auditorías energéticas, lo cual conlleva básicamente a dos aspectos:

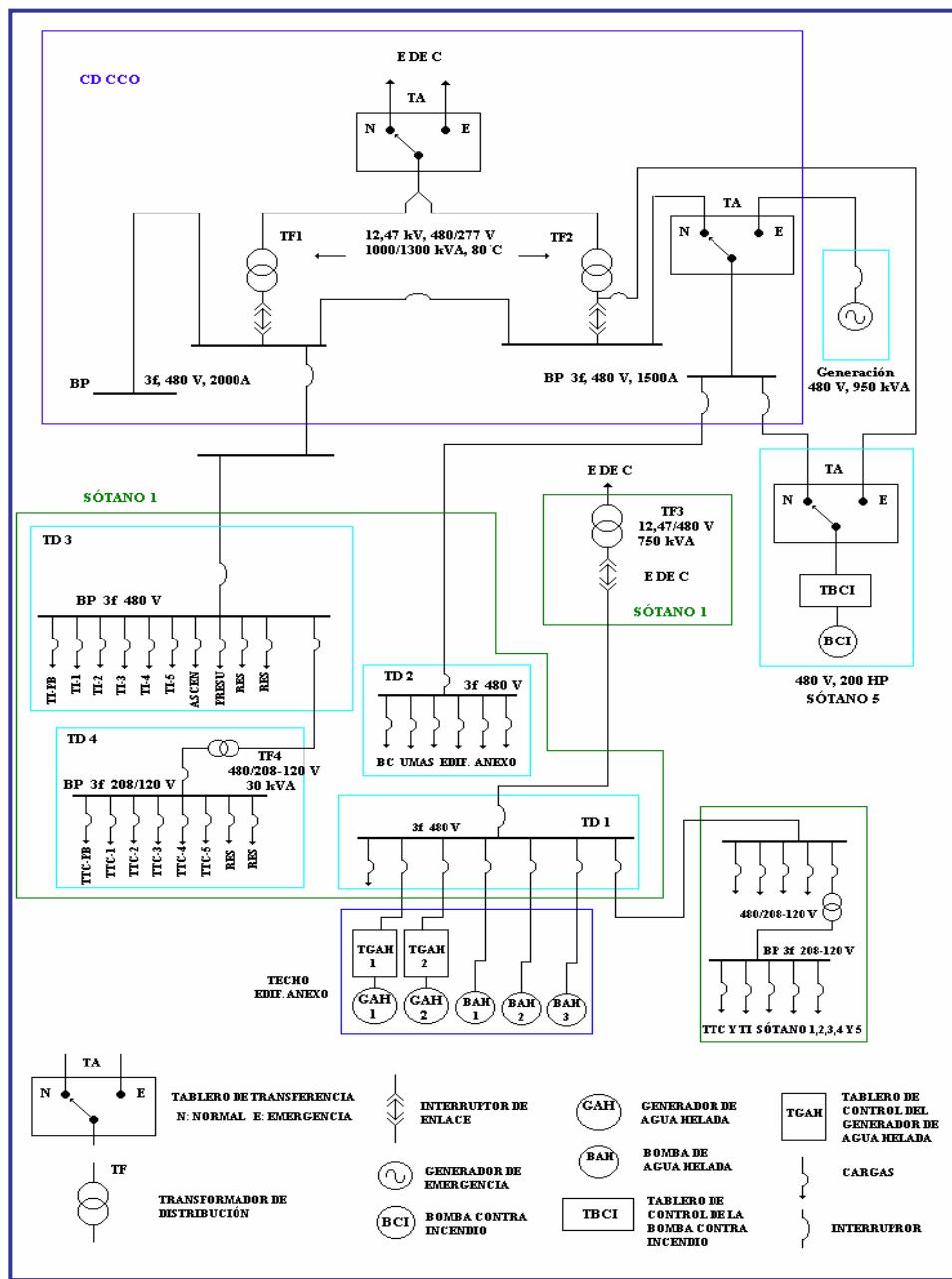
- Diseño de estrategias para la racionalización y aprovechamiento óptimo de la energía.
- La factibilidad de utilización de nuevas tecnologías para ahorro de energía

Para el desarrollo de este plan se dispone de un edificio de prueba, que se denomina Edificio Piloto, el cual es el Edificio Anexo La Hoyada. En este edificio se realiza la mayor parte de las actividades administrativas de la C. A. Metro de Caracas y se encuentra ubicado en la avenida Universidad, esquina Coliseo, ciudad de Caracas.

#### **3.1. Síntesis del Sistema de Energía Eléctrica del Edificio Anexo la Hoyada.**

El Edificio Anexo La Hoyada satisface sus requerimientos de electricidad, por medio del Sistema de Electrificación para Auxiliares (S.E.A), encargado de suministrar energía eléctrica a todos los equipos que no están relacionados directamente con el sistema de transporte (tracción).

La energía eléctrica proviene de la Electricidad de Caracas, a una tensión de 12,47 KV (corriente alterna), que luego es reducida a 480V, por medio de una serie de transformadores, para el suministro de energía a los tableros de distribución principal, ubicados en los sótanos del estacionamiento del edificio, específicamente en el sótano 1 del Edificio Anexo la Hoyada. En la **Figura 3.1** se muestra el plano de distribución eléctrica del edificio.



**Figura 3.1.** Tableros de Distribución Eléctrica del Edificio Anexo la Hoyada.

El tablero de distribución principal (TD1), se encarga de suministrar energía eléctrica a los generadores de agua helada, bombas de agua helada, tableros de iluminación y tomacorrientes de los sótanos del estacionamiento.

El tablero de distribución principal (TD2), recibe alimentación de una celda ubicada en el cuarto de tableros del edificio Centro de Control de Operaciones (CCO), adyacente al

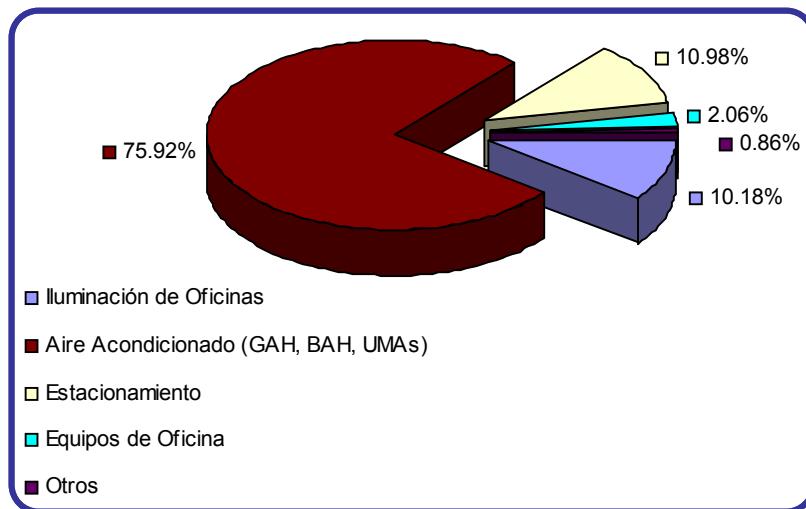
Edificio Anexo la Hoyada, éste se encarga de suministrar energía eléctrica a las unidades de manejo de aire del edificio y de ventilación de los baños.

Los tableros de distribución restantes (TD3 y TD4), se encargan de suministrar energía eléctrica para iluminación de los diferentes pisos del edificio, ascensor, presurizador y tomacorrientes.

### **3.2. Resultados de la Auditoría Energética Aplicada al Edificio Anexo la Hoyada.**

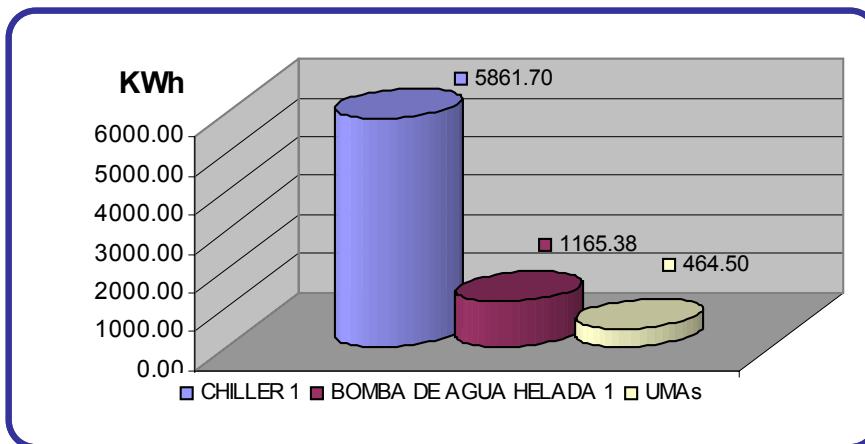
La auditoría energética fue realizada por personal técnico de la C. A. Metro de Caracas, consistió en el registro de mediciones eléctricas a los distintos tableros de distribución de energía del edificio, lo cual se realizó mediante el analizador de energía VIP SYSTEM 3, cuyas características técnicas se muestran en el apéndice F, este equipo, se conectó en forma trifásica a cada uno de los tableros en forma separada durante una (1) semana para observar el comportamiento del consumo y demanda de energía eléctrica en el edificio. Las mediciones fueron realizadas para un tiempo de funcionamiento de los equipos de 24 horas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la auditoría energética, el consumo total promedio de energía eléctrica del edificio Anexo La Hoyada, en un período de 24 horas, se encuentra en el orden de 10 MWh, distribuido entre sistema de iluminación de oficinas, sistema de aire acondicionado, estacionamiento, tomacorrientes y otros. La **Figura 3.2** muestra en forma porcentual el consumo de cada uno de los sistemas mencionados.



**Figura 3.2.** Consumo Total de Energía Eléctrica del Edificio Anexo la Hoyada.

Tal como se observa en el gráfico anterior, el consumo de energía eléctrica del sistema de aire acondicionado en el Edificio Anexo la Hoyada, se encuentra en el orden del 76%. En la **Figura 3.3** se muestra el consumo de energía eléctrica de los diferentes equipos que conforman el sistema de aire acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada.



**Figura 3.3:** Consumo de Energía de los Equipos del Sistema de Aire Acondicionado del Edificio Anexo operando las 24 horas.

Como puede observarse en la **Figura 3.3**, el mayor consumo de energía del sistema de aire acondicionado se debe al chiller, que con 5861,70 KWh, representa el 78,24% del

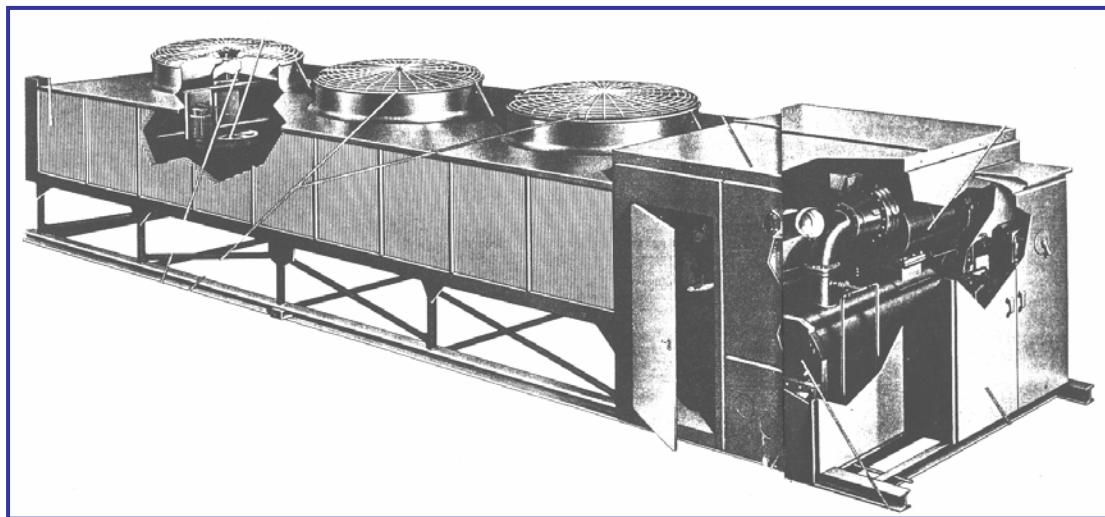
total que consumen todos los equipos. El consumo de la bomba de agua helada representa el 15,56% y por último las UMAs utilizan el 6,20%.

### 3.3. Descripción del Sistema de Aire Acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada.

El Edificio Anexo la Hoyada consta de seis (6) niveles, su sistema de aire acondicionado es de tipo central, está constituido por seis (6) unidades de manejo de aire (UMAs), las cuales se encuentran distribuidas una por cada nivel, además se tienen dos (2) generadores de agua helada o chillers y tres (3) bombas de agua helada, ubicados en la azotea del edificio; aparte de los equipos mencionados, el sistema de aire acondicionado posee un conjunto de tuberías y ductos que intercomunica dichos equipos. La disposición de los equipos mencionados, se puede observar en los **Anexos 1 y 2**.

#### 3.3.1 Características del Generador de Agua Helada o Chiller (GAH).

El sistema de aire acondicionado del Edificio Anexo La Hoyada contiene dos chillers de marca TRANE Air Conditioning; estos equipos son de tipo centrífugo enfriados por aire, cada uno tiene una capacidad de 320 TR (ver **Figura 3.4**), y se encargan de suministrar el agua helada requeridas por las UMAs del Edificio Anexo La Hoyada y las del Edificio CCO; se encuentran instalados en la azotea del edificio.



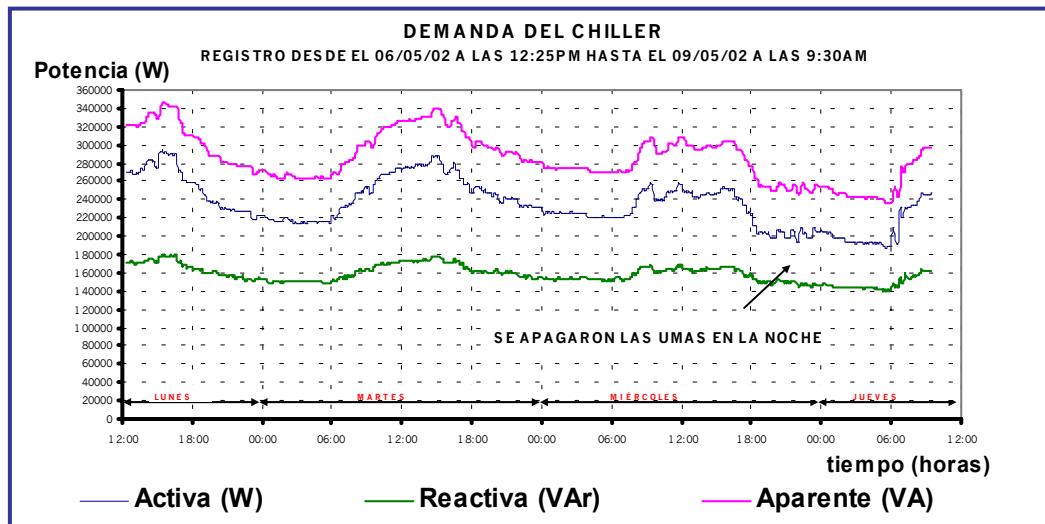
**Figura 3.4:** Chiller Centrífugo Enfriado por Aire, marca Trane.

El chiller 1 (GAH1), opera en un régimen de 24 horas al día, debido a que en el edificio CCO se encuentra personal operando durante las 24 horas, por lo cual las UMAs deben funcionar continuamente en ese período de tiempo. De igual manera, una (1) UMA del Edificio Anexo la Hoyada, debe operar las 24 horas del día para acondicionar el área de vigilancia del edificio. El chiller 2 (GAH2), se utiliza como reserva y opera en caso de que el chiller 1 falle o se someta a mantenimiento. Ambos chillers tienen las mismas características técnicas, las cuales se presentan en la **Tabla 3.1**.

**Tabla 3.1** Características de los Generadores de Agua Helada (chillers) del Edificio Anexo la Hoyada.

GENERADORES DE AGUA HELADA (CHILLERS)					
CAPACIDAD (TR / MJ)	TEMP. DE ENTRADA AIRE CONDENSACION (K)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s) / (GPM)	TEMP. SALIDA DEL AGUA (K)	ΔT AGUA	POTENCIA (KW)
320 / 4051,41	305,37	0,047 / 750	279,26	10	368

De acuerdo a las mediciones eléctricas realizadas en la auditoría energética se obtuvo el registro que se muestra en la **Figura 3.5**.



**Figura 3.5:** Demanda del Chiller del Edificio Anexo La Hoyada.

Los registros de mediciones eléctricas para el GAH-1, corresponden a un período de cuatro (4) días continuos, sin embargo, es necesario destacar que la demanda disminuye en la noche, ya que se apagan algunas UMA's, y el chiller se autoregula de acuerdo al número de UMA's operativas, por lo cual, se obtiene el consumo promedio por cada 24 horas de operación. En la **Tabla 3.2** se observa el consumo de energía del chiller 1 durante 24 horas.

**Tabla 3.2.** Consumo de Energía Promedio del Chiller 1 del Edificio Anexo la Hoyada, durante 24 horas.

ENERGIA		
Fase	Activa (KWh)	Reactiva (KVAr)
Trifásica	5861,7	3859,58

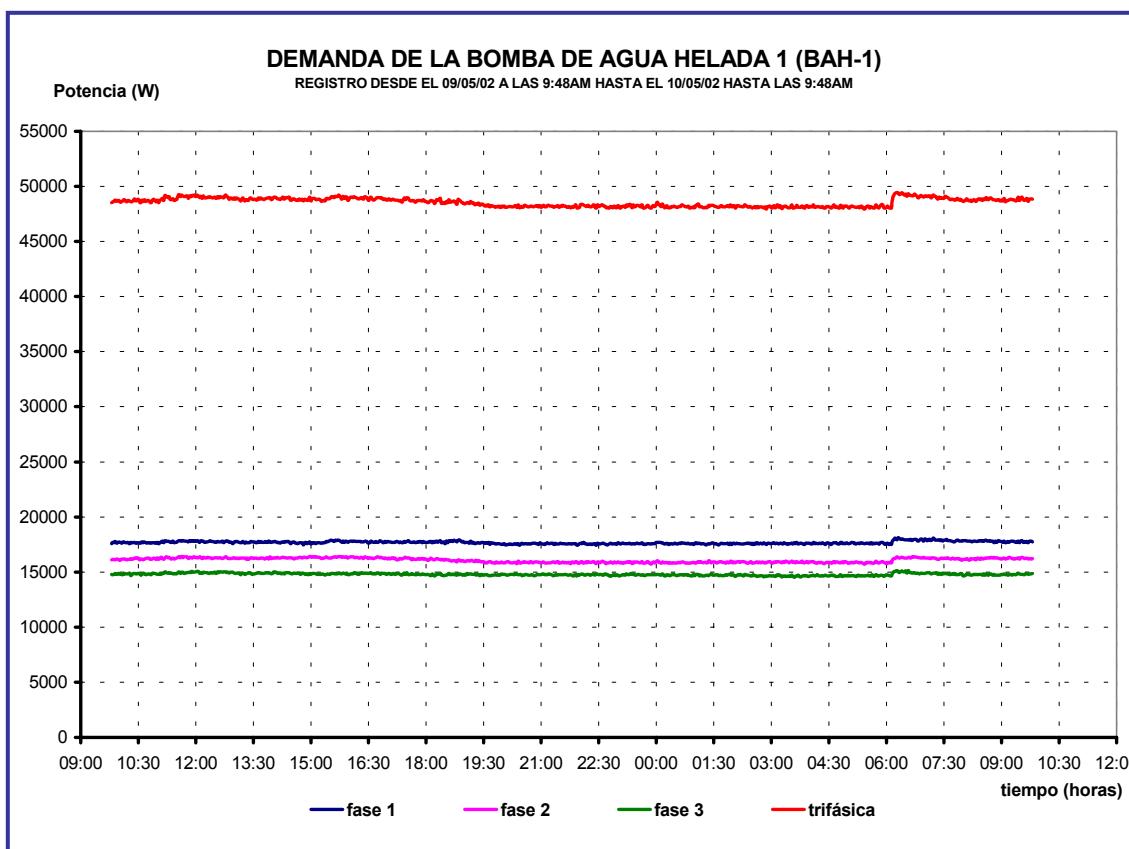
### 3.3.2 Características de las Bombas de Agua Helada (BAH).

El sistema de bombas de agua helada consta de tres (3) unidades centrífugas, de marca KSB, las cuales son de succión axial, descarga radial y poseen las mismas características técnicas. Al igual que los chillers, están instaladas en la azotea del edificio. Su régimen de funcionamiento es el siguiente: en condiciones normales opera solamente la bomba de agua helada 1 (BAH-1), debido a que el resto de las bombas (BAH-2 y BAH-3) son de reserva y se utilizan en caso de que la BAH-1 falle o se someta a mantenimiento. La **Tabla 3.3** señala las características de las bombas y sus motores.

**Tabla 3.3** Características de las bombas del Edificio Anexo la Hoyada.

TIPO	CAPACIDAD (m <sup>3</sup> /s)	ALTURA (metro H <sub>2</sub> O)	RPM	POTENCIA DEL MOTOR (kW) / HP	TENSIÓN (V)	CORRIENTE (A)	TAMAÑO DEL IMPULSOR (m)
CENTRÍFUGAS	0,068	54,86	1750	55,93 / 75	440	93	0,38

La bomba de agua helada 1, funciona en conjunto con el chiller 1 y su régimen de operación es de 24 horas. En la **Figura 3.6** se muestra el registro obtenido en la auditoría energética de la bomba, durante 24 horas, allí se observa que la curva de demanda de la bomba es prácticamente constante debido a que la bomba opera en forma continua y no posee ningún mecanismo de control. El consumo de la bomba de agua helada durante 24 horas se señala en la **Tabla 3.4**.



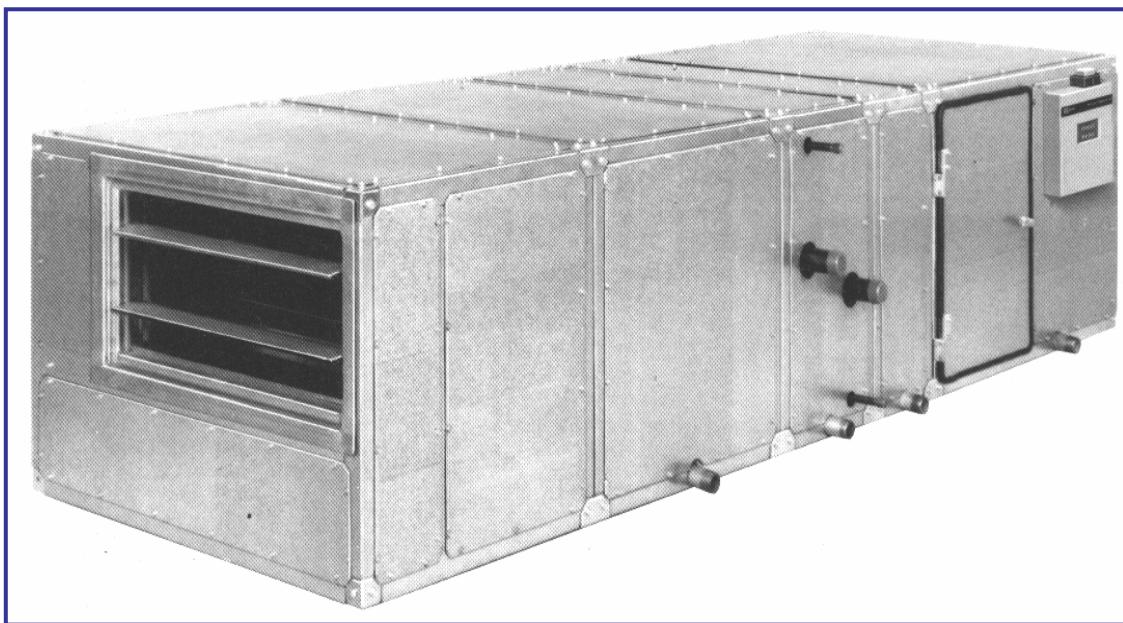
**Figura 3.6:** Demanda de la Bomba

**Tabla 3.4:** Consumo de Energía de la Bomba de Agua Helada (BAH-1) durante 24 horas.

ENERGIA		
Fase	Activa (KWh)	Reactiva (KVAr)
Trifásica	1165,3751	801,7210

### 3.3.3. Características de las Unidades de Manejo de Aire (UMAs).

El Edificio Anexo La Hoyada, posee un total de seis (6) UMAs y se encuentran distribuidas una (1) por cada nivel, instaladas en cuartos individuales. Las UMAs son de marca TRANE Air Conditioning, son unidades que constan de tres (3) módulos: módulo 1: filtro metálico, módulo 2: serpentín de enfriamiento y módulo 3: ventilador. Cada unidad posee un tablero de control para encendido y apagado, así como una serie de dispositivos que permiten regular la temperatura del aire y medir la temperatura del agua en las tuberías (**Figura 3.7**). Las UMAs del Edificio Anexo La Hoyada son de tipo monozona y sus características se presentan en la **Tabla 3.4**.

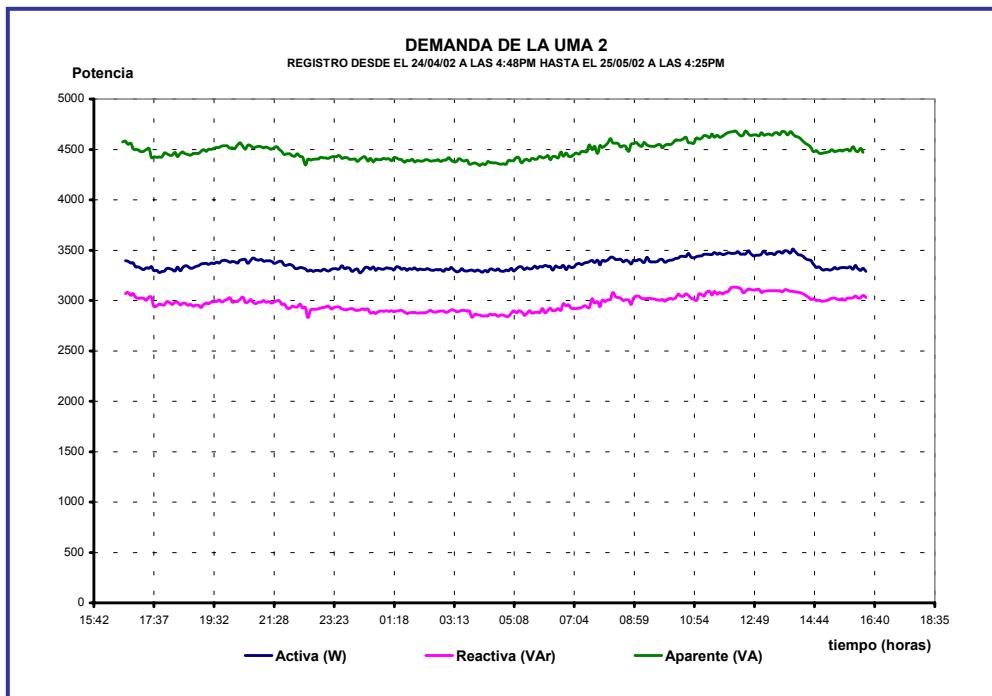


**Figura 3.7:** UMAs del Edificio Anexo la Hoyada.

**Tabla 3.5** Tabla de Características Técnicas de las UMAs del Edificio Anexo la Hoyada.

ITEM	UBICACIÓN Y TIPO	CARGA TERMICA (MBH)/(TR)	VENTILADOR			SERPENTIN DE ENFRIAMIENTO		
			CAUDAL (PCM) / (m <sup>3</sup> /s)	PRESIÓN ESTÁTICA (Pulg H <sub>2</sub> O) / (KPa)	POTENCIA (HP) / (KW)	AGUA		AIRE
						CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	Δ P (Pulg H <sub>2</sub> O) / (Pa)	CAUDAL AIRE FRESCO (PCM) / (m <sup>3</sup> /s)
UMA 1	PLANTA BAJA MONOZONA	166,7 / 13,89	5230 / 2,47	1,92 / 0,48	5 / 3.72	2,1*10 <sup>-3</sup>	1,4	590 / 0,28
UMA 2	PLANTA EZZ. MONOZONA	147,0 / 12,25	4730 / 2,23	1,67 / 0,41	5 / 3.72	1,9*10 <sup>-3</sup>	1,1	515 / 0,24
UMA 3	PLANTA PISO 1 MONOZONA	150,4 / 12,53	4700 / 2,22	1,68 / 0,42	5 / 3.72	1,9*10 <sup>-3</sup>	1,2	540 / 0,25
UMA 4	PLANTA PISO 2 MONOZONA	175,2 / 14,6	5130 / 2,42	1,94 / 0,48	5 / 3.72	2,2*10 <sup>-3</sup>	1,5	660 / 0,31
UMA 5	PLANTA PISO 3 MONOZONA	175,2 / 14,6	5130 / 2,42	1,94 / 0,48	5 / 3.72	2,2*10 <sup>-3</sup>	1,5	660 / 0,31
UMA 6	PLANTA PISO 4 MONOZONA	175,2 / 14,6	5130 / 2,42	1,94 / 0,48	5 / 3.72	2,2*10 <sup>-3</sup>	1,5	660 / 0,31

Debido a que las seis (6) unidades de manejo de aire del Edificio Anexo La Hoyada presentan las mismas características técnicas y la misma cantidad de horas de operación, sólo se realizaron las mediciones a la UMA ubicada en el piso 2, cuyo registro se muestra en la **Figura 3.8**

**Figura 3.8:** Demanda de la UMA 2 del Edificio Anexo la Hoyada.

Es muy importante hacer notar que las cargas térmicas que manejan las UMA varían en mínimos porcentajes, por lo cual, se asume igual comportamiento de las unidades de manejo de aire en relación al consumo de energía eléctrica y con ello se reduce la cantidad de registros y mediciones eléctricas. Al extraer los resultados obtenidos a las seis (6) UMA del edificio se obtiene el consumo total de las mismas, tal como lo muestra la **Tabla 3.6**.

**Tabla 3.6:** Consumo Total de Energía de las UMA del Edificio Anexo la Hoyada.

ENERGIA		
Fase	Activa (KWh)	Reactiva (Kva.)
Trifásica	482,7600	426,9492

#### **IV. AHORRO TEÓRICO Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN EN LA INCORPORACIÓN DE LOS EQUIPOS DE AHORRO DE ENERGÍA.**

El consumo de energía eléctrica de los equipos de acondicionamiento de aire del Edificio Anexo la Hoyada representa un alto porcentaje del consumo total en ese edificio, ello fue demostrado en la auditoría energética realizada, por tanto el ahorro de energía que se realizará con la incorporación de los equipos estudiados está en función de disminuir los resultados obtenidos en dicha auditoría.

Hasta ahora se han tratado diferentes equipos de ahorro de energía en sistemas de climatización (aire acondicionado y ventilación mecánica), con el objeto de encontrar el más idóneo a las necesidades del Edificio Anexo la Hoyada. Es importante recordar, que las ruedas disecantes no tienen aplicación a sistemas de aire acondicionado, razón por la cual no se realiza el análisis de ahorro con este equipo.

En referencia a los demás equipos estudiados, se analizan económicamente las ruedas entálpicas, los truncadores de potencia inteligentes y los convertidores de frecuencia, debido a su alto potencial de adaptación al sistema de acondicionamiento de aire del Edificio Anexo la Hoyada; mientras que los sensores de CO<sub>2</sub>, por ser equipos que requieren, para su incorporación en los sistemas de aire acondicionado, convertidores de frecuencia en los ventiladores y la adición de elementos de control dentro de los ambientes acondicionados, que generan costos elevados, además de que no se cuenta con las herramientas necesarias para medir el comportamiento de los niveles de CO<sub>2</sub> en el edificio, no se tomará en consideración este tipo de equipos para los análisis económicos.

#### **4.1 Análisis de la Incorporación de Ruedas Entálpicas en el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.**

El ahorro de energía que producen las ruedas entálpicas, se logra al disminuir las cargas térmicas del sistema de acondicionamiento de aire, y éste se refleja en la reducción del consumo de energía eléctrica por parte de las UMAs primordialmente, debido a que al disminuir la carga térmica que ellas manejan, se reduce la cantidad de energía necesaria para lograr el enfriamiento requerido por el aire; además de ello, para obtener las condiciones de aire de suministro, las UMAs requieren menor volumen de agua helada, lo que afecta directamente a chillers y bombas, disminuyendo su régimen de operación y occasionando un efecto positivo sobre su eficiencia.

##### **4.1.1 Selección de las Ruedas Entálpicas para el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.**

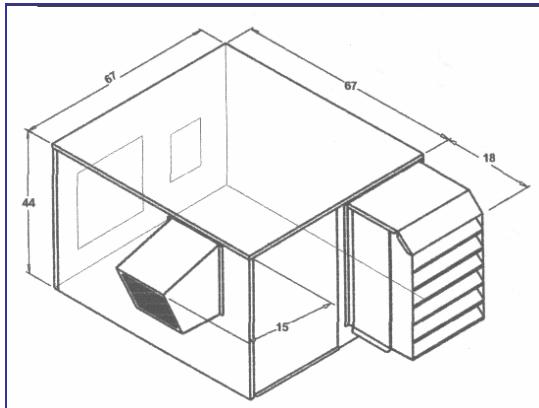
La selección de las ruedas entálpicas se realiza por medio de un software de selección de equipos de Greenheck, denominado “Computer Aided Product Selection” versión 1.11. Este software permite la selección del equipo adecuado, de acuerdo a las condiciones de diseño del sistema de aire acondicionado.

Según la disposición de los ductos de suministro de aire fresco en el Edificio Anexo, se escoge un arreglo de rueda entálpica de tipo “D” y de acuerdo a los volúmenes de aire fresco que se manejan, se escoge el modelo ERV-521H-15-D, el cual está capacitado para manejar la suma de los volúmenes de aire fresco de las seis (6) UMAs del sistema de aire acondicionado del Edificio Anexo. Las **Tablas 4.1 y 4.2** muestran un resumen de las condiciones de diseño y las características del modelo seleccionado de rueda entálpica.

**Tabla 4.1:** Condiciones de Diseño del Sistema de Aire Acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada.

	Aire Fresco	Aire Interior	Aire de Suministro	Volumen de Aire Fresco Total
Temperatura de bulbo seco (tbs)	92 °F 306,48 K	75 °F 297,04 K	80,2 °F 299,93 K	
Temperatura de bulbo húmedo (tbh)	86 °F 303,15 K	-----	71,2 °F 294,93K	3625 CFM 1,71 m <sup>3</sup> /s
Humedad Relativa	-----	50%	-----	

**Tabla 4.2:** Características de Rueda Entálpica para la Aplicación al Edificio Anexo la Hoyada.

Modelo	Tipo de Arreglo	Dimensiones	Eficiencia
ERV-521H-15-D	Arreglo tipo D (los ductos de aire viciado y suministro de aire se conectan a un lado de la Rueda Entálpica)	 <p>Alto: 44 in / 1,117 m  Ancho: 85 in / 2,159 m  Prof.: 67 in / 1,701 m  Peso: 1200 lb / 544,31 Kg.</p>	69,3 %

#### 4.1.2 Ahorro Teórico y Tiempo de Recuperación de Inversión de las Ruedas Entálpicas.

Los cálculos de período de retorno de inversión de la rueda entálpica seleccionada y el ahorro de energía, se realizan de igual manera por medio del software señalado en la sección 4.2; la **Tabla 4.3**, muestra los datos utilizados, así como los resultados obtenidos para el sistema estudiado.

**Tabla 4.3:** Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión de la Rueda Entálpica en el Sistema de Aire Acondicionado en Estudio.

	Cargas de Enfriamiento/año (BTU)	Cargas de Enfriamiento/año (MJ)	KWh/mes	KWh/año	Bs/mes + IVA	Bs/año + IVA
Sistema Original	813375891	858157	19865	238377	678767	8145209
Sistema Con Rueda Entálpica	249401384	263132	6091	73092	208127	2497525
Rueda Entálpica	----	----	1030	12363	35203	422437
<b>Ahorro</b>	----	----	<b>14804</b>	<b>177648</b>	<b>505843</b>	<b>6070121</b>

<b>Costo KWh (Bs/KWh)</b>	29	<b>Inversión Inicial (Bs)</b>	16798368
---------------------------	----	-------------------------------	----------

Nota: Se toma en consideración un aumento del 15% anual del costo KWh	<b>AHORRO (Bs.)</b>	<b>1er. Año</b>	<b>2do. Año</b>	<b>3er. Año</b>	<b>4to. Año</b>	<b>5to año</b>
	<b>Mensual</b>	505843	581720	668978	769325	884723
	<b>Anual</b>	6070121	6980639	8027735	9231896	10616680
	<b>Acumulado</b>	6070121	13050761	21078496	30310391	40927071

## 4.2 Análisis de la Incorporación de Truncadores de Potencia Inteligentes en el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.

La función de los truncadores de potencia inteligentes, dentro de un sistema de aire acondicionado, es regular y controlar el comportamiento de los motores de inducción. En el caso estudiado, existen 3 posibilidades de aplicación para estos equipos, las cuales son: ventiladores de las UMA, motor del compresor del chiller y motor de la bomba de agua helada.

### 4.2.1 Selección de Truncadores de Potencia Inteligentes para el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.

La selección de los truncadores de potencia inteligentes se realiza de acuerdo a los criterios presentados en el capítulo II; para el caso de la aplicación al chiller, debido a que los truncadores de potencia inteligentes, poseen una gama de potencias que no cubren los requerimientos del motor del compresor, no es posible la aplicación de este equipo al chiller.

De acuerdo a las características de la bomba de agua helada y los ventiladores de las UMA, se muestran en la **Tabla 4.4**, los modelos de truncadores de potencia inteligentes que se ajustan al sistema, en conjunto con sus características.

**Tabla 4.4:** Truncadores de Potencia Inteligentes para la Bomba de Agua Helada y Ventiladores de UMA, del Edificio Anexo la Hoyada.

Modelo	Corriente	Tensión
05241 (UMAs)	15 Amp.	208 – 480 VAC
05244 (Bomba)	120 AMP.	208 – 480 VAC

#### 4.2.2 Ahorro Teórico y Tiempo de Recuperación de Inversión de los Truncadores de Potencia Inteligentes.

Los cálculos de período de recuperación de inversión de truncadores de potencia inteligente, así como el ahorro que se obtiene al aplicarlos en los ventiladores de las seis (6) UMA del Edificio Anexo la Hoyada, se presentan en la **Tabla 4.5**.

**Tabla 4.5:** Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión del Truncador de Potencia Inteligente, aplicado a los Ventiladores de las UMA del Edificio Anexo la Hoyada.

<b>Motor de 5 HP para las Unidades de Manejo de Aire</b>					
	KWh/mes	KWh/año	Bs/mes + IVA	Bs/año + IVA	
Sistema Original	18805	225664	642568	7710815	
Sistema Con Power Planner	15840	190080	541244	6494929	
<b>Ahorro</b>	<b>2965</b>	<b>35584</b>	<b>101324</b>	<b>1215886</b>	
Costo KWh (Bs/KWh)	29.33	# Vent. 6 Tiempo de Operación (Vent.) 16	TPI (Vent.) Instalación	1113600 600000	
					<b>Inversión Inicial Total 7281600</b>
Nota: Se toma en consideración un aumento del 15% anual del costo KWh	<b>Ahorro (Bs)</b>	1er.Año	2do. Año	3er. Año	4to. Año
	Mensual	101324	116522	134001	154101
	Anual	1215886	1398269	1608009	1849210
		Acumulado	1215886	2614154	4222163
<b>RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN (meses)</b>		55	<b>Ahorro de Energía (%)</b>		16

De igual manera, se muestra, en la **Tabla 4.6**, el análisis de recuperación de inversión y ahorro de energía, al aplicar los truncadores de potencia inteligentes a la bomba de agua helada.

**Tabla 4.6:** Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión del Truncador de Potencia Inteligente, aplicado a la Bomba de Agua Helada del Edificio Anexo la Hoyada.

<b>Motor de 75 HP para la Bomba de Agua Helada</b>				
	KWh/mes	KWh/año	Bs/mes + IVA	Bs/año + IVA
Sistema Original	45062	540744	1539744	18476925
Sistema Con Power Planner	38279	459348	1307972	15695669
<b>Ahorro</b>	<b>6783</b>	<b>81396</b>	<b>231771</b>	<b>2781256</b>
Costo KWh (Bs/KWh)	29.33	Tiempo de Operación (Bomba)	24	<b>3155200</b>
				Instalación <b>600000</b>
				<b>Inversión Inicial Total (Bs) 3755200</b>
Nota: Se toma en consideración un aumento del 15% anual del costo KWh	Ahorro (Bs)	1er.Año	2do. Año	3er. Año
	Mensual	231771	266537	306518
	Anual	2781256	3198445	3678211
	Acumulado	2781256	5979701	9657913
<b>RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (meses)</b>		<b>55</b>	Ahorro de Energía (%)	<b>16</b>

### 4.3 Análisis de la Incorporación de Convertidores de Frecuencia para el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.

#### 4.3.1 Selección de los Convertidores de Frecuencia para el Sistema de Climatización del Edificio Anexo la Hoyada.

Los convertidores de frecuencia tienen aplicación en motores de inducción, esto fue estudiado en el capítulo II, por lo tanto, en el sistema de aire acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada pueden incorporarse a los ventiladores de las UMA, compresor del chiller y a la bomba de agua helada. No obstante, el compresor del chiller presenta una gran limitación, la cual es, que es un equipo de viejas generaciones y tiene muchos años de operación, lo cual no permite control o ni regulaciones en su régimen de operación;

por lo tanto, sólo se realiza el estudio de factibilidad para la Bomba de Agua Helada y las seis (6) UMA<sub>s</sub> del edificio, ya que éstas presentan menor tiempo de operación.

De acuerdo a las características de la bomba de agua helada y los ventiladores de las UMA<sub>s</sub>, además de los criterios de selección ya estudiados, se escogen los siguientes modelos de convertidores de frecuencia:

- Para cada una de las UMA<sub>s</sub>: Convertidor de Frecuencia Marca Siemens, Modelo: 6SE6420 – 2UCC22 – 2BA0. Serie MM420
- Para la bomba de agua helada: Convertidor de Frecuencia Marca Siemens, Modelo: 6SE6440 – 2UC34 – 5FA0. Serie MM440

#### **4.3.2 Ahorro Teórico y Tiempo de Recuperación de Inversión de los Convertidores de Frecuencia.**

Los cálculos de período de recuperación de inversión de los convertidores de frecuencia, así como el ahorro que se obtiene al aplicarlos en los ventiladores de las seis (6) UMA<sub>s</sub> del Edificio Anexo la Hoyada, se presentan en la **Tabla 4.7**.

**Tabla 4.7:** Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión de los Convertidores de Frecuencia, aplicados a los Ventiladores de las UMA's del Edificio Anexo la Hoyada.

<b>Variador de Frecuencia en las UMA's</b>				
	KWh/mes	KWh/año	Bs/mes + IVA	Bs/año + IVA
Sistema Original	14531	174673	496519	5958226
Sistema Con Power Planner	13049	156587	445874	5350487
<b>Ahorro</b>	<b>1482</b>	<b>18086</b>	<b>50645</b>	<b>607739</b>
Costo KWh (Bs/KWh)	29.33		Inversión Inicial Total (Bs)	<b>15668784</b>
Nota: Se toma en consideración un aumento del 15% anual del costo KWh	<b>Ahorro (Bs)</b>	1er.Año	2do. Año	3er. Año
	Mensual	50645	58242	66978
	Anual	607739	698900	803735
	Acumulado	607739	1306639	2110374
<b>RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (meses)</b>		<b>64</b>	<b>Ahorro de Energía (%)</b>	<b>10.20</b>

De igual manera, se muestra, en la **Tabla 4.8**, el análisis de recuperación de inversión y ahorro de energía, al aplicar un convertidor de frecuencia a la bomba de agua helada.

**Tabla 4.8:** Ahorro de Energía y Recuperación de Inversión del Variador de Frecuencia, aplicado a la Bomba de Agua Helada del Edificio Anexo la Hoyada.

<b>Variador de Frecuencia en la Bomba</b>				
	KWh/mes	KWh/año	Bs/mes + IVA	Bs/año + IVA
Sistema Original	35078	420939	1198596	14383152
Sistema Con Variador de Frecuencia	31500	377998	1076338	12916052
<b>Ahorro</b>	<b>3578</b>	<b>42941</b>	<b>122258</b>	<b>1467100</b>

Costo KWh (Bs/KWh)	29.33	Inversión Inicial Total (Bs)	<b>17159984</b>
--------------------	-------	------------------------------	-----------------

Nota: Se toma en consideración un aumento del 15% anual del costo KWh	<b>Ahorro (Bs)</b>	1er.Año	2do. Año	3er. Año	4to. Año	5to. Año
	Mensual	122256	140594	161684	185936	213827
	Anual	1467073	1687134	1940204	2231234	2565919
	Acumulado	1467073	3154206	5094410	7325644	9891563

<b>RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (meses)</b>	<b>64</b>	<b>Ahorro de Energía (%)</b>	<b>10.20</b>
---	-----------	------------------------------	--------------

La **Tabla 4.9** muestra un resumen comparativo de los aspectos técnicos y económicos de la aplicación de los equipos de ahorro de energía en el sistema de aire acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada.

**Tabla 4.9.** Resumen Comparativo de la Incorporación de los distintos Equipos de Ahorro de Energía en el Edificio Anexo la Hoyada.

Equipo	Ahorro de Energía (%)	Ahorro de Energía (KWh/año)	Consumo del Sistema de Aire Acondicionado (KWh/año)	Consumo del Sistema con el Equipo de Ahorro de Energía (KWh/año)	Ahorro Total (%)	Ahorro (Bs/año)	Inversión Incial (Bs)	Retorno de Inversión (meses)
Rueda Entálpica	69.34	177648	2734426.7	2556778.7	6.50	5210416	17159984	30
Truncadores de Potencia Inteligentes	15.05	81396	2734426.7	2653030.7	2.98	2387345	3755200	16
Variadores de Frecuencia	10.2	149651	2734426.7	2584775.7	5.47	4389264	32828768	64

## V. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE AHORRO DE ENERGÍA.

Para realizar la selección del equipo de ahorro de energía más idóneo para la aplicación en estudio, se utilizará el Método de Decisión Múltiple Binaria, el cual, está establecido en la C.A. Metro de Caracas, entre sus estándares para selección de equipos y proveedores, y es avalado y utilizado por IEEE y ASME. Este método permite evaluar parámetros preestablecidos de los equipos, de forma simple, ya que utiliza pares aislados de tipo: mejor/peor, para comparar cada uno de los parámetros, contra todos los demás, mediante la construcción de matrices binarias.

Para establecer los parámetros a evaluar en el proceso de selección del equipo y optimizar el análisis de los mismos, se clasificaron estos parámetros en tres grupos, luego, en consenso con expertos y sugerencias de los proveedores, se acordaron los porcentajes de importancia, los cuales se muestran a continuación:

- a) Económico/Financiero (40%)
- b) Técnico (50%)
- c) Servicio (10%)

El grupo económico, se le asigna una ponderación de 40% y abarca los siguientes parámetros:

1. Costo del Equipo (50%): es la inversión inicial necesaria para la adquisición del equipo, ésta incluye transporte, instalación y puesta en funcionamiento del mismo.
2. Costos de Equipos Adicionales (10%): inversión inicial necesaria para la adquisición de equipos auxiliares necesarios para la puesta en funcionamiento del equipo de ahorro de energía.

3. Recuperación de la Inversión (40%): periodo de tiempo que permite recuperar la cantidad destinada a costos iniciales del equipo.

El grupo técnico, es el de mayor importancia, por lo tanto se le asigna una ponderación de 50% y en él se reúnen los siguientes parámetros:

1. Durabilidad (20%): tiempo de vida útil del equipo de ahorro de energía.
2. Adaptabilidad al Espacio Disponible (20%): representa la capacidad de adaptación del equipo a las limitaciones físicas existentes realizando la menor cantidad de cambios.
3. Ahorro de Energía (60%): porcentaje de disminución en el consumo de energía eléctrica obtenido al incorporar el equipo de ahorro de energía.

Por último, el grupo de servicio, con una ponderación de 10%, reúne los siguientes parámetros:

1. Costo de Mantenimiento (40%): gasto económico realizado al equipo durante su vida útil para que éste opere dentro de los parámetros de diseño.
2. Disponibilidad en el Mercado (60%): representa la cantidad de proveedores del equipo en el mercado, ya que éstos determinan los precios de los equipos, a la vez que, ofrecen mano de obra especializada para la realización del mantenimiento.

Los criterios que se consideran para la evaluación de los parámetros anteriormente descritos para cada equipo, se fundamentan en las características de los equipos descritas en el capítulo II, además de información adicional que se muestra en los apéndices, análisis económicos del capítulo IV y datos obtenidos mediante reuniones con los fabricantes y proveedores de los equipos.

La nomenclatura utilizada en las matrices de evaluación de los parámetros, es la siguiente: rueda entálpica (E1), convertidor de frecuencia (E2) y truncador de potencia inteligente (E3); estas matrices se presentan a continuación:

**Tabla 5.1:** Matrices del Grupo Económico.

Parámetro: Costo del equipo				Parámetro: Equipos Adicionales			
	E1	E2	E3		E1	E2	E3
E1	0	0	1	0	0.33		
E2	1	0	0	2	0.67		
E3	0	0	0	0	0		
				3	1		

Parámetro: Recuperación de Inversión				
	E1	E2	E3	
E1	0	0	1	
E2	1	0	1	
E3	0	0	0	
	1	0.33		
	2	0.67		
	0	0		
	3	1		

Atributo	1	2	3	Total
Ponderación	50%	10%	40%	100%
Rueda Entálpica	0.33 0.17	0.33 0.033	0.33 0.13	0.33
Truncadores de Potencia Inteligentes	0.67 0.33	0.67 0.067	0.67 0.27	0.67
Variadores de Frecuencia	0 0	0 0	0 0	0

**Tabla 5.2:** Matrices del Grupo de Servicio.

Parámetro: Disponibilidad				Parámetro: Costo de Mantenimiento			
	E1	E2	E3		E1	E2	E3
E1	0	1	0	1	0.33		
E2	0	0	0	0	0		
E3	1	1	0	2	0.67		
				3	1		

Atributo	1	2	Total
Ponderación	40%	60%	100%
Rueda Entálpica	0	0.33	0.2
	0	0.2	
Truncadores de Potencia Inteligentes	0.67	0	0.27
	0.27	0	
Variadores de Frecuencia	0.33	0.67	0.53
	0.13	0.40	

**Tabla 5.3:** Matrices del Grupo Técnico.

Parámetro: Durabilidad			
	E1	E2	E3
E1	0	1	1
		2	0.67
E2	0	0	0
		0	0
E3	0	1	0
		1	0.33
		3	1

Parámetro: Adaptabilidad			
	E1	E2	E3
E1	0	0	0
		0	0
E2	1	0	1
		2	0.67
E3	0	1	0
		1	0.33
		3	1

Parámetro: Ahorro obtenido en energía			
	E1	E2	E3
E1	0	1	1
		2	0.67
E2	0	0	1
		1	0.33
E3	0	0	0
		0	0
		3	1

Atributo	1	2	3	Total
Ponderación	20%	20%	60%	100%
Rueda Entálpica	0.67	0	0.67	0.53
	0.13	0	0.40	
Truncadores de Potencia Inteligentes	0	0.67	0.33	0.33
	0	0.13	0.2	
Variadores de Frecuencia	0.33	0.33	0	0.13
	0.067	0.067	0	

**Tabla 5.4:** Matriz de Selección Final.

Grupo de Atributos	Económico: 1	Técnico: 2	Servicio: 3	Total
Ponderación	40%	50%	10%	100%
Rueda Entálpica	0.33 0.13	0.53 0.27	0.2 0.02	0.42
Truncadores de Potencia Inteligentes	0.67 0.27	0.33 0.17	0.27 0.027	0.47
Variadores de Frecuencia	0 0	0.14 0.07	0.53 0.053	0.123

Como puede observarse en las matrices anteriores, al aplicar el Método de Decisión Múltiple Binaria y evaluar los parámetros establecidos, se selecciona el truncador de potencia inteligente como equipo de ahorro de energía factible a ser incorporado en el sistema de aire acondicionado del Edificio Anexo la Hoyada, ya que es el equipo que obtiene mayor puntaje total (47%). Es importante destacar, que la ponderación de cada grupo de parámetros evaluados fue acordada en consenso con proveedores y consultas con expertos vía Internet, y los resultados obtenidos proporcionan una base para la aplicación de estos equipos en otros sistemas, ya que se determina el equipo más adecuado en forma integral, evaluando simultáneamente los aspectos económico, técnico y de servicio.

## **CONCLUSIONES**

1. El crecimiento del consumo energético en Venezuela durante el año 2001, ha superado las estimaciones del SEN, ubicándose en 5,28%, a la vez que presenta una tendencia creciente para los próximos años.
2. La campaña de ahorro de energía iniciada por el Ejecutivo Nacional, está basada únicamente, en la disminución del consumo de energía eléctrica en edificaciones de entidades públicas.
3. El consumo de energía eléctrica de los sistemas de climatización de edificaciones de la C.A. Metro de Caracas se encuentra en el orden del 20% de los gastos de la empresa.
4. De acuerdo con el presente estudio, se determinaron tres tipos de equipos de ahorro de energía en climatización: mecánicos, que actúan sobre la psicrometría del aire, para facilitar su manejo en las unidades de ventilación o acondicionamiento; electrónicos, que regulan la operación de los motores para adecuarla a las necesidades de uso y el tercer tipo, el cual reúne las características de los dos anteriores.
5. Las ruedas disecantes, como equipos de ahorro de energía, solo son aplicables a sistemas de ventilación mecánica.
6. Los truncadores de potencia, además de ahorro de energía, protegen a los motores de inducción durante su operación y extienden la vida útil de los mismos.
7. El efecto de ahorro de energía que produce la rueda entálpica, se manifiesta en la disminución de consumo de cada uno de los componentes del sistema de aire acondicionado.

8. El consumo total promedio de energía eléctrica del edificio Anexo La Hoyada, en un período de 24 horas, se encuentra en el orden de 10 MWh.
9. Los chillers del sistema de acondicionamiento de aire del Edificio Anexo la Hoyada, representan el 78% aproximadamente del consumo del sistema, mientras que las bombas consumen el 15,56% y las UMAs solo el 6% restante.
10. El porcentaje de reducción del consumo de energía eléctrica que puede obtenerse con la incorporación de los equipos estudiados, depende de las características del sistema.
11. Los truncadores de potencia inteligentes tienen un período de recuperación de inversión menor al de los otros equipos, pese a que no son los que producen el mayor porcentaje de ahorro de energía.
12. La mayor limitación al incorporar equipos de ahorro de energía a sistemas instalados de aire acondicionado, es la reducida disponibilidad de espacio para adaptar el equipo.
13. El truncador de potencia inteligente es el equipo de ahorro de energía más adecuado a incorporar en el Edificio Anexo la Hoyada.
14. Los convertidores de frecuencia presentan mejores condiciones de servicio en comparación con los equipos estudiados.
15. Las ruedas entálpicas presentan mayores ventajas técnicas que los convertidores de frecuencia y los truncadores de potencia inteligentes.
16. La optimización del sistema se evidencia al seleccionar los truncadores de potencia inteligentes, los cuales permiten el ahorro de energía sin modificar las condiciones actuales, dada su facilidad de adaptación.
17. El Método de Decisión Múltiple Binaria produce resultados en forma integral, evalúa distintos aspectos de los equipos en estudio.

18. Con la aplicación del Método de Decisión Múltiple Binaria se minimiza la subjetividad, sin embargo, se debe consultar a proveedores y expertos para asignar el grado de importancia de los parámetros a evaluar.

## RECOMENDACIONES

1. Difundir en distintas empresas de carácter privado, la situación de déficit de energía eléctrica existente en el país, para crear políticas de ahorro dentro de las instituciones, que contribuyan a solucionar la problemática que presenta el SEN.
2. Analizar las distintas alternativas que ofrecen las nuevas tecnologías, para obtener ahorro de energía mediante disminución de la demanda, incluyendo los truncadores de potencia inteligentes y los convertidores de frecuencia.
3. Dar a conocer las distintas alternativas de ahorro de energía planteadas en este trabajo, a distintas instituciones, tanto de carácter privado, como público.
4. Modificar hábitos de uso y horario en la utilización de los sistemas de aire acondicionado dentro del Edificio Anexo la Hoyada, que contribuyan con la reducción del consumo energético en el edificio.
5. Estudiar la factibilidad de poner en funcionamiento, en determinados períodos de tiempo, los chillers del edificio CCO, los cuales son de menor capacidad que el correspondiente al Edificio Anexo la Hoyada, para disminuir el impacto que produce éste en el consumo de energía eléctrica del edificio.
6. Ajustar las ratas de suministro de aire fresco en el Edificio Anexo la Hoyada a las recomendadas por ASHRAE, utilizando la rueda entálpica, para obtener calidad total de aire sin aumentar los niveles de consumo de energía eléctrica en el edificio.
7. Considerando la disponibilidad de recursos económicos, se podría combinar distintos equipos de ahorro de energía, como las ruedas entálpicas en conjunto con los truncadores de potencia.

8. Considerar los equipos de ahorro de energía como componentes de los sistemas de climatización, al efectuar los diseños, para evitar problemas de disponibilidad de espacio.
9. Dar a conocer los nuevos métodos de cálculo de cargas térmicas, planteados por ASHRAE, los cuales permiten reducir el sobredimensionamiento de los equipos y en consecuencia, disminuir el consumo de energía eléctrica.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Aponte Douglas. “Evaluación de Demanda y Establecimiento de Políticas de Ahorro de Energía Eléctrica en una Instalación (Edificio Anexo - la Hoyada) de la C. A. Metro de Caracas”, Caracas 2003, Universidad Central de Venezuela, 149 páginas.
2. Cámara Venezolana de la Industria Eléctrica (CAVEINEL). “Estadísticas Consolidadas”, Caracas 2001, 31 páginas.
3. Cargocaire. “Econocaire Total Enthalpy Heat Exchangers”, Amesbury 1978, 107 páginas.
4. Cohen Miguel. “Apuntes de Aire Acondicionado”, Caracas 1999, Universidad Central de Venezuela, 136 páginas.
5. Danfoss. “Convertidores de Frecuencia. Guía de Diseño”, Caracas 1991, 176 páginas.
6. Danfoss. “Facts worth Knowing about Frequency Converters”, 1991, 137 páginas.
7. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, número 37377.
8. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, número 37411.
9. Greenheck. “Application Manual”, 1997, 51 páginas.
10. Greenheck. “Model ERV Energy Recovery Ventilator”, 1999, 15 páginas.
11. Herrera Hansel y Salazar Gustavo. “Estudio Técnico – Económico de Factibilidad para la Actualización y Automatización de Unidades de Manejo de

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Aire de Gran Capacidad”, Caracas 1997, Universidad Central de Venezuela, 150 páginas
12. IEEE Engineering Management Society. Volumen EM 32 Número 2, 1985.
13. KSB. “Catálogo de Bombas Centrífugas”, 40 páginas.
14. Mata, José L. “Análisis Técnico Económico de los Ciclos Combinados usando Turbinas de Combustión de Tecnología Avanzada”. Caracas 1999, Universidad Central de Venezuela, 172 páginas.
15. Ministerio de Energía y Minas, INDENE e IDEC. “Talleres de Capacitación en Ahorro de Energía Eléctrica para Funcionarios Públicos”, Caracas 2002, 90 páginas.
16. Ministerio de Energía y Minas. “Guía de Operaciones de Ahorro de Energía Eléctrica en Edificaciones Públicas”, Caracas 2002, 91 páginas.
17. Nediani, G. “Consumo Energético en Sistemas de Aire Acondicionado (Convencionales y no Convencionales)”, Caracas 1998, Universidad Central de Venezuela, 28 páginas
18. Pita, Edward. Principios y Sistemas de Refrigeración, Limusa, México. 327 pág.
19. Rashid Muhamad. “Controlador de Potencia”, 820 páginas.
20. RJG. “Catálogo de Truncadores de Potencia Inteligentes Power Planner”, 2000, 10 páginas.
21. RJG. “Libro Digital sobre Truncadores de Potencia Inteligentes”, Caracas 2002, 15 páginas.
22. Rockwell Automation. “Motores Polifásicos de Inducción”, 1996, 58 páginas.
23. Telemecanique. “Controladores para Motores ALTIVAR 5 TDEP”, 247 páginas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

24. TRANE. “Air Cooled Centravac”, 1983, 36 páginas.
25. TRANE. “Modular Climate Changer Air Handlers”, 1990, 214 páginas.
26. Uxmal Amézquita, “Perspectivas de Rehabilitación y/o Repotenciación de la Central Hidroeléctrica “Raúl Leoni” ante los Requerimientos del Sistema Eléctrico Nacional”, Caracas 1999, Universidad central de Venezuela, 14 páginas.
27. YORK. “CO<sub>2</sub> Ventilation Controller”, 95 páginas.
28. YORK. “Presentación Digital: Energy Recovery Ventilation”, 2001, 30 páginas.

### Referencias World Wide Web

Noviembre 2002

<http://www.energuia.com>

<http://www.caveinel.org.ve>

<http://www.edelca.com.ve/externo/>

<http://www.opsis.com.ve/>

Enero 2003

<http://www.energysmart/powerplannerIII/htm>

<http://www.trane.com>

<http://www.york.com>

## ABREVIATURAS Y UNIDADES

- AC: Corriente Alterna.
- C.A.: Compañía Anónima.
- C.A.M.C.: Compañía Anónima Metro de Caracas.
- CosΦ: coseno del ángulo Φ
- DC: Corriente Directa.
- Etc.: etcétera.
- GWh: Giga Watts hora.
- h: entalpía.
- Hz: Hertz.
- I.V.A.: Impuesto al Valor Agregado.
- K: Kelvin.
- Kg: Kilogramo.
- KVa: Kilo Voltio Ampere
- KW: Kilo Watts.
- Lb: libras.

- LC:
- m: metro
- $m^3$ : metros cúbicos.
- mcs: metros cúbico por segundo.
- msnm: metros sobre el nivel del mar.
- MW: Mega Watts.
- n: velocidad angular.
- Pág.: páginas
- PLC: Controlador Lógico Programable.
- rpm: revoluciones por minuto.
- V: Voltios.

## GLOSARIO

**Absorción:** acción de atraer un cuerpo y retener entre sus moléculas las de otro, líquido o gaseoso, mezcla o interpenetración de dos sustancias.

**Acondicionamiento de aire:** control de la calidad, cantidad, temperatura y humedad del aire en una habitación o edificio dentro de límites preestablecidos para lograr el confort.

**Adsorción:** fenómeno de superficie, en el cual se produce la adhesión de moléculas de gases o líquidos a la superficie de sólidos porosos.

**Armónicos:** componentes destructivos y por lo tanto no deseados en todo sistema de tensión y corriente, cuya magnitud es variable dependiendo del número de dicho componente.

**Capacidad instalada:** es la capacidad nominal bajo carga continua de las unidades generadoras.

**Carga latente:** toda carga térmica que produce una variación en la humedad del aire en movimiento a temperatura de bulbo seco constante.

**Carga sensible:** toda carga térmica cuyo único efecto sobre las propiedades intensivas del aire en movimiento es una variación de la temperatura.

**Carga térmica:** cantidad de calor disipado por el sistema de aire acondicionado en un instante determinado.

**Carta psicrométrica:** es un gráfico en el cual se representan las propiedades del aire atmosférico.

**Caudal:** velocidad de flujo o transferencia de electricidad, magnetismo, agua, calor, energía, etc, utilizada para indicar la cantidad que cruza una unidad de área de una superficie determinada en una unidad de tiempo.

**Cavitación:** es una condición en ciertos puntos dentro de la turbomáquina donde la presión local cae hasta la presión de vapor del líquido y forma cavidades llenas de vapor, al ser transportadas estas cavidades hacia regiones de mayor presión, se colapsan rápidamente debilitando la superficie sólida y pudiendo ocasionar erosión y superficie de la superficie.

**Climatización:** Dar a un espacio limitado, las condiciones necesarias para obtener la presión, temperatura y humedad del aire convenientes para la salud o confort.

**Condensación:** es el resultado de la reducción de la temperatura causada por la eliminación del calor latente de evaporación.

**Consumo de energía:** es la energía requerida y consumida por las diferentes categorías de suscriptores durante un período de tiempo.

**Corriente alterna:** es aquella cuya intensidad varía periódicamente y cambia de dirección, pasando de un modo alterno por valores positivos y negativos.

**Corriente continua:** es aquella que fluye siempre en la misma dirección, con intensidad casi siempre variable.

**Damper:** dispositivo que se utiliza para modular el caudal de aire en ventiladores y duchota.

**Demanda:** velocidad con que la energía eléctrica se entrega a un sistema o retirada del mismo. Cantidad de energía requerida para satisfacer las necesidades de las diferentes categorías de suscriptores.

**Diodo:** es un elemento semiconductor diseñado para conducir corriente sólo en una dirección: del ánodo al cátodo.

**Disecante:** es un material sólido o líquido, como el cloruro de litio, liclotriatílenico, silice gel; que tiene gran capacidad para retener y almacenar el vapor de agua contenido en el aire.

**Enfriamiento con deshumidificación:** es un proceso de enfriamiento que ocurre a lo largo de una línea de humedad constante.

**Entalpía:** contenido total de calor en el aire: la suma de las entalpías de aire seco y vapor de agua, por unidad de peso de aire seco.

**Factor de potencia:** está definido por el coseno del ángulo que se forma entre la tensión y la corriente en un circuito eléctrico por causa de la impedancia presente en el mismo.

**Frecuencia:** número de ciclos o períodos completos de corriente producidos por un generador de corriente alterna por segundo.

**Humedad relativa:** es la relación entre el contenido de humedad y la capacidad de humedad del aire a la misma temperatura.

**Mezcla adiabática:** mezcla de dos o más corrientes de aire, que ocurre sin adición ni eliminación de calor, o sea, adiabáticamente.

**Par o torque:** es la fuerza de giro en el eje del motor resultante de la interacción magnética entre el rotor y el estator.

**PLC:** controlador lógico programable.

**Potencia activa:** es la potencia que produce trabajo útil y genera calor.

**Potencia aparente:** es el producto del voltaje aplicado a un circuito y la corriente que circula por él.

**Potencia reactiva:** es la potencia requerida para formar el campo electromagnético necesario para la operación del equipo inductivo eléctrico ( motores, transformadores, etc).

**Propiedades termodinámicas:** propiedades básicas que definen el estado de una sustancia (presión, temperatura, volumen, entalpía, entropía).

**Saturación:** situación alcanzada al contener un material en tal estado y cantidad, que no puede aceptar más de dicho material en el mismo estado.

**Temperatura de bulbo seco:** temperatura que se mide mediante un termómetro ordinario.

**Termostato:** dispositivo que regula automáticamente la temperatura de un recipiente, local o aparato.

**Tiristores (TRIAC, SCR):** es el nombre asignado a una familia de elementos semiconductores constituidos hasta por cuatro capas semiconductoras, poseen tres terminales: ánodo, cátodo y compuerta; para que los tiristores entren en estado de conducción, es necesaria una señal en la compuerta. Existen varios tipos: de conmutación rápida (SCR), de triodo bidireccional (TRIAC), de desactivación por compuerta (GTO), entre otros.

**Transformadores:** son elementos que se encargan de elevar la tensión alterna para la transmisión, o reducirlo para su distribución.

**Transistores:** conjunto de tamaño reducido y largo servicio para la ampliación de las señales eléctricas.

**Valor nominal:** es el dato que se informa en la placa de características que los fabricantes incluyen en sus equipos.

**Velocidad:** distancia recorrida por unidad de tiempo.

**Ventilación:** movimiento de un caudal de aire a cierta velocidad mediante el empleo de algún dispositivo mecánico.

**Voltaje o tensión:** conjunto de voltios que actúan en un aparato o sistema eléctrico.

**APÉNDICE A**

**PRINCIPALES CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE VENEZUELA.**

Las unidades existentes en el país, de acuerdo a la empresa a la cual pertenecen, se listan a continuación:

CADAFE, con sus plantas Pedro Camejo, La Cabrera, Planta Centro, Guanta, Alfredo Salazar, Coro, Luisa Cáceres, San Fernando, Punto Fijo y Planta Táchira cuenta con un parque térmico cuya capacidad instalada es de 3558 MW. En sus planes de repotenciación está previsto alargar la vida útil e incrementar las unidades de las plantas: Pedro Camejo, Punto Fijo, San Fernando y Planta Táchira.

LA ELECTRICIDAD DE CARACAS, cuenta con la Planta Oscar Augusto Machado en el estado Miranda, Complejo Ricardo Zuloaga, Convento, Planta Arrecife, Tacoa.

ENELVEN cuenta con una capacidad instalada de 1211 MW, en sus plantas Ramón Laguna, Rafael Urdaneta, Concepción, santa Bárbara y Casigua.

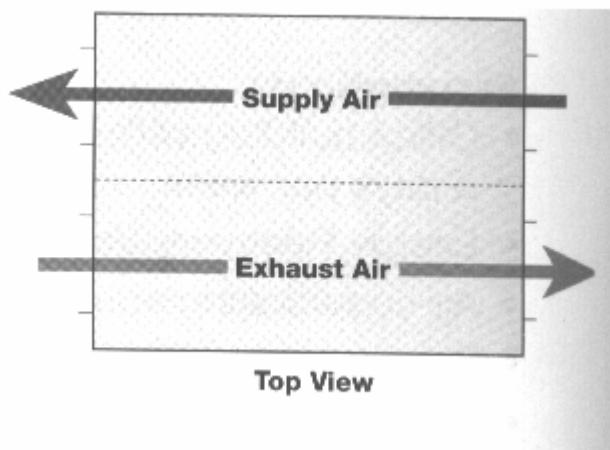
En lo que respecta al parque de generación hidroeléctrico, CADAFE cuenta en la región sur-occidental andina con las Plantas Peña Larga, San Agatón y Planta Páez, con una capacidad instalada de 620 MW. En la región de Guayana, EDELCA cuenta con las centrales hidroeléctricas Raúl Leoni o Guri y Macagua (Casa de Máquinas I, II y III).

**APÉNDICE B**

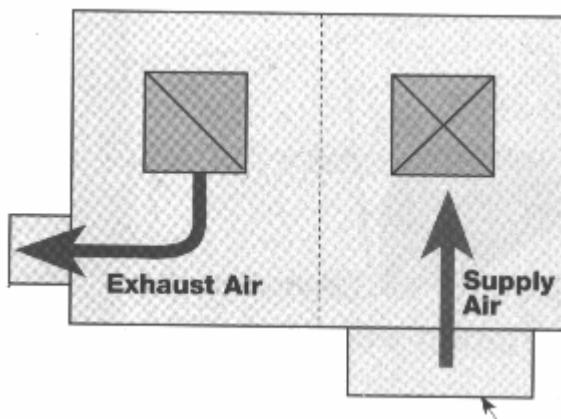
**RUEDAS ENTÁLPICAS.**

**ARREGLOS SEGÚN LAS CONDICIONES DE INSTALACIÓN.**

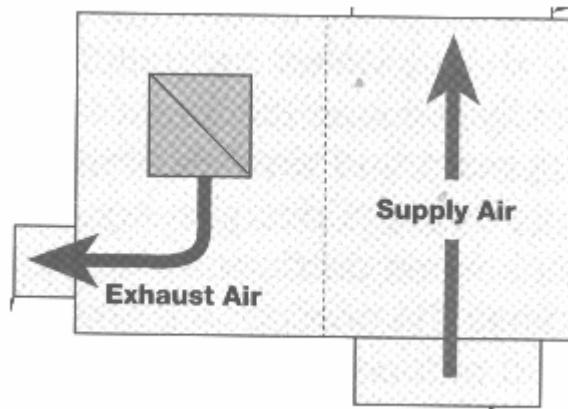
ARREGLO A: utilizado en montajes interiores. Todos los modelos se encuentran disponibles para este tipo de arreglo.



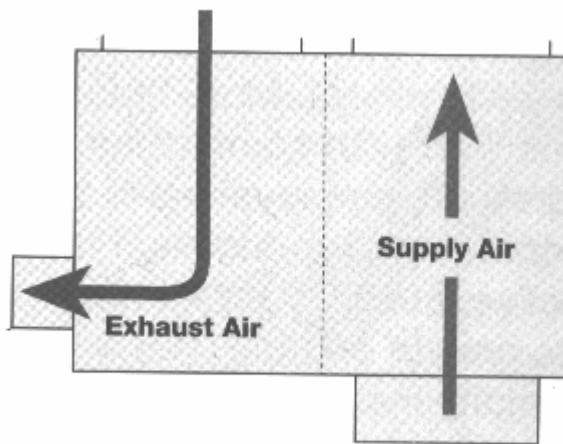
ARREGLO B: utilizado en montajes sobre el techo. Los ductos de suministro y aire viciado penetran el techo y se unen a la rueda entálpica a través de su piso.



ARREGLO C: utilizado en instalaciones sobre el techo donde la corriente de aire de suministro puede ser empotrado directamente a la rueda entálpica y el aire viciado se conecta para que entre desde abajo.



ARREGLO D: utilizado sobre el techo, en ambientes exteriores, donde los ductos de aire de suministro y viciado se conectan a un lado de la rueda.



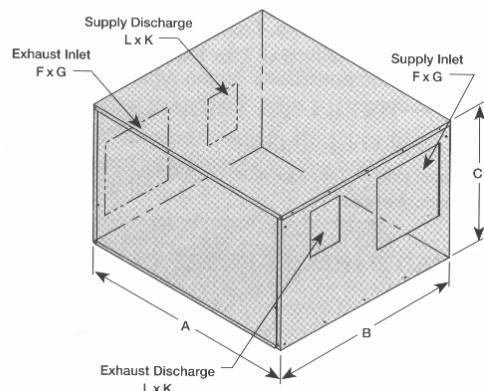
**DIMENSIONES DE LAS RUEDAS ENTÁLPICAS.**

**MODELS ERV-251, ERV-361 & ERV-521**

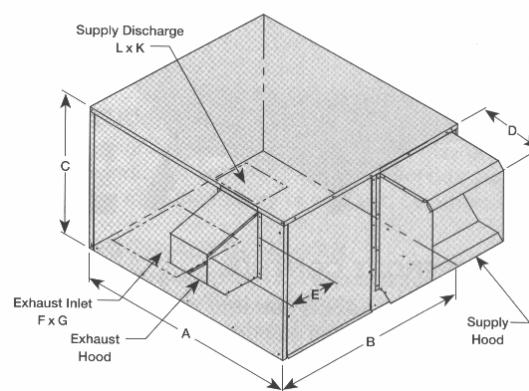
Model	Exterior Dimensions					Duct Dimensions				Weight (lbs)
	A	B	C	D	E	F	G	K	L	
ERV-251	46	34	27	16	8	10	16	6 3/4	7	180
ERV-361	62	51	34	15	15	18	18	8 3/8	11 1/2	600
ERV-521	67	67	44	18	15	24	24	10 3/4	13 1/2	1000

All dimensions are in inches.

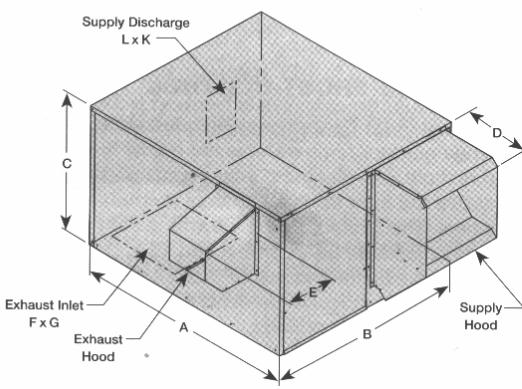
**Arrangement A**



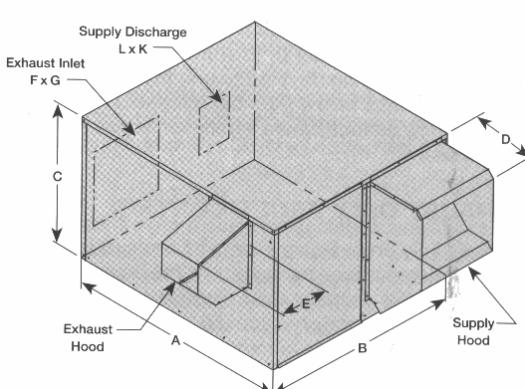
**Arrangement B**



**Arrangement C**



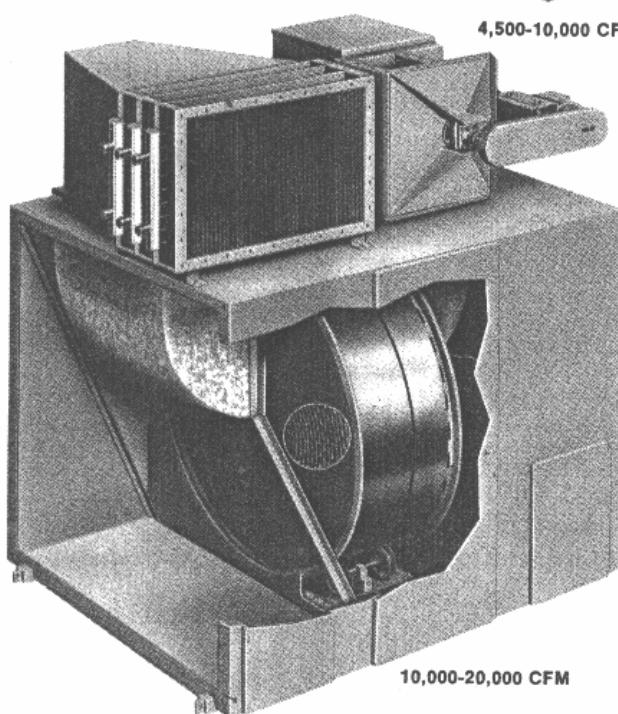
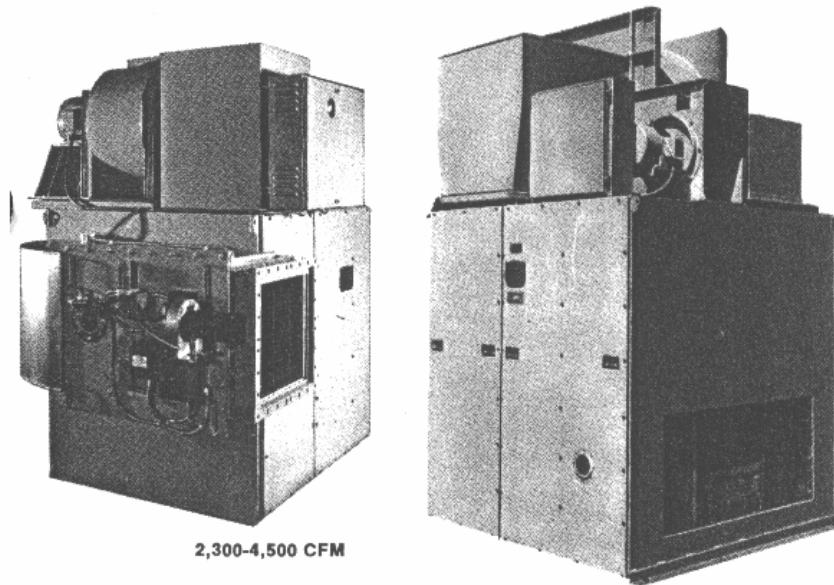
**Arrangement D**



**APÉNDICE C**

**RUEDAS DISECANTES**

**MODELOS**



**DIMENSIONES DE LA RUEDA DISECANTE**

## APÉNDICE

---

### STANDARD MODELS

HoneyCombe Model No.	Operating Values @ .075 Density External S.P. ("W.G.) and Motor Hp						Reactivation Energy Approx. BTUH	Overall Dimensions Approx. — Inches			Shipping Data — Approx.		
	Dry Air			Reactivation Air				Length	Width	Height	Gross Weights — Lbs.	Crate Cubic	
	CFM	"WG	Hp	CFM	"WG	Hp					Domestic	Export Crated	Cu. Ft.
HC- 50	50	0.5	1/10	15	0.25	—	2,470	14	9	24	45	85	3
HC- 150	150	0.5	1/6	45	1.0	—	10,000	21	20	30	95	150	12
HC- 500-EA	500	1/2	3/4	150	—	1/3	27,000	44	24	40	650	820	40
HC- 500-SA	500	1/2	3/4	150	—	1/3	27,000	55	24	40	670	850	46
HC- 750-EA	750	1	225	—	1/3	40,000	57	36	40	645	1,000	68	
HC- 750-SA	750	1	225	—	1/3	40,000	60	27	40	635	995	55	
HC- 755-EA	750	1	200	—	1/2	41,000	74	26	55	680	1,060	85	
HC- 755-SA	750	1	200	—	1/2	41,000	82	26	55	700	1,100	93	
HC- 1125-EA	1,125	1 1/2	300	—	1/2	64,000	74	28	55	690	1,080	90	
HC- 1125-SA	1,125	1 1/2	300	—	1/2	64,000	82	28	55	710	1,120	98	
HC- 1500-EA	1,500	1 1/2	400	—	3/4	80,000	60	37	61	860	1,250	105	
HC- 1500-SA	1,500	1 1/2	400	—	3/4	80,000	66	37	61	850	1,240	114	
HC- 1500-GA	1,500	1 1/2	400	—	3/4	80,000	77	54	61	1,000	1,480	160	
HC- 2250-EA	2,250	0.1	3	600	0.1	1	120,000	60	41	61	1,060	1,570	114
HC- 2250-SA	2,250	to	3	600	to	1	120,000	66	43	61	910	1,330	130
HC- 2250-GA	2,250	1.0	3	600	1.0	1	120,000	77	61	61	1,160	1,730	210
HC- 3000-EA	3,000	3	800	—	3/4	160,000	71	48	77	1,450	2,200	190	
HC- 3000-SA	3,000	3	800	—	3/4	160,000	76	47	77	1,450	2,200	200	
HC- 3000-GA	3,000	3	800	—	3/4	160,000	85	58	77	1,580	2,400	270	
HC- 4500-EA	4,500	7 1/2	1,200	—	1 1/2	240,000	71	55	81	1,680	2,560	227	
HC- 4500-SA	4,500	7 1/2	1,200	—	1 1/2	240,000	76	54	81	2,000	3,080	238	
HC- 4500-GA	4,500	7 1/2	1,200	—	1 1/2	240,000	85	65	81	1,977	3,040	316	
HC- 6000-EA	6,000	5	1,500	—	1 1/2	320,000	90	70	110	2,200	3,200	475	
HC- 6000-SA	6,000	5	1,500	—	1 1/2	320,000	90	70	110	2,150	3,125	475	
HC- 6000-GA	6,000	5	1,500	—	1 1/2	320,000	108	70	110	2,500	3,650	563	
HC- 9000 EA	9,000	10	2,400	—	3	480,000	96	76	114	2,900	4,250	567	
HC- 9000-SA	9,000	10	2,400	—	3	480,000	91	76	114	2,825	4,140	534	
HC- 9000-GA	9,000	10	2,400	—	3	480,000	108	76	114	2,900	4,250	627	
HC-13500-SA	13,500	—	3,600	—	5	675,000	140	68	116	4,600	6,350	743	
HC-13500-SB	13,500	—	3,600	—	5	675,000	109	68	116	3,600	5,000	580	
HC-20000-SA	20,000	—	5,400	—	10	1,000,000	150	68	116	4,600	6,350	794	
HC-20000-SB	20,000	to	5,400	to	10	1,000,000	120	68	116	3,600	5,000	638	
HC-25040-SB	25,000	suit	6,700	—	10	1,300,000	124	96	95	4,000	6,500	820	
HC-25040-SA	25,000	—	6,700	—	10	1,300,000	152	96	95	5,100	7,800	970	
HC-25060-SB	25,000	—	10,000	—	20	2,000,000	134	96	95	5,600	7,600	940	
HC-25060-SA	25,000	—	10,000	—	20	2,000,000	162	96	95	7,000	9,600	1,070	

## APÉNDICE

---

### APÉNDICE D

#### TRUNCADORES DE POTENCIA

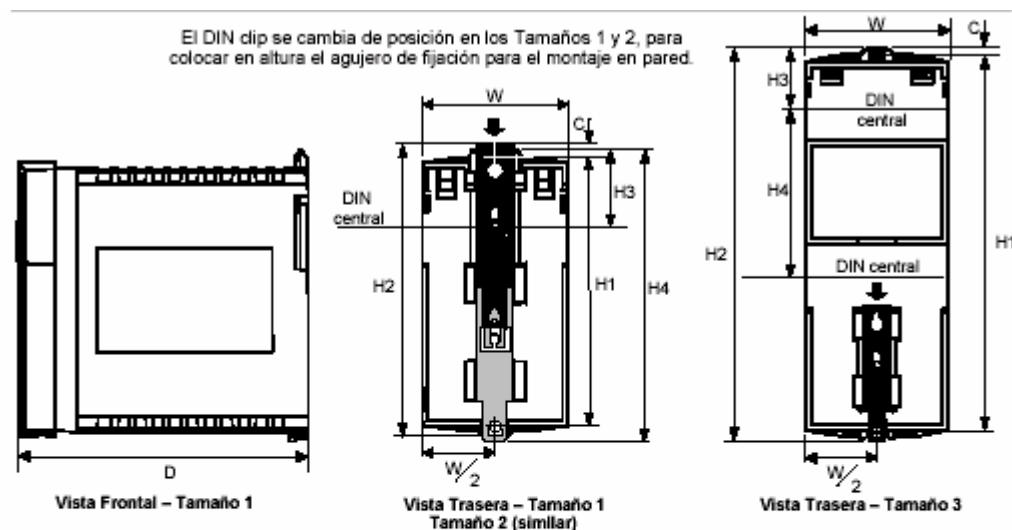
Descripción del equipo	Dimensiones			Peso (Kg)
	Alto (cm)	Ancho (cm)	Profund (cm)	
Modelo 05241, 208-480 VAC, <b>15 AMP</b> , NEMA 3	38	23.5	18	7
Modelo 05242, 208-480 VAC, <b>30 AMP</b> , NEMA 3	38	23.5	18	7
Modelo 05243, 208-480 VAC, <b>60 AMP</b> , NEMA 12	46	31	18.5	13
Modelo 05244, 208-480 VAC, <b>120 AMP</b> , NEMA 12	46	31	18.5	17
Modelo 05245, 208-480 VAC, <b>250 AMP</b> , NEMA 12	51	51	24	32
Modelo 05260, 208-480 VAC, <b>500 AMP</b> , NEMA 12	76	76	23	77

## APÉNDICE E

### CONVERTIDORES DE FRECUENCIA

#### DIMENSIONES

#### SERIE ALTIVAR



	Fijación	Par	Peso	Centro de Fijación H1	H2	H3	H4	C	W	D
Tamaño 1	M4	1.5Nm	0.85kg	132 (5.2")	143 (5.6")	35 (1.4")	139 (5.5")	6 (0.2")	73 (2.9")	142 (5.6")
Tamaño 2	M5	3.0Nm	1.4kg	188 (7.4")	201 (7.9")	35 (1.4")	194 (7.7")	6.5 (0.24")	73 (2.9")	173 (6.8")
Tamaño 3	M5	3.0Nm	2.7kg	242 (9.5")	260 (10.2")	38 (1.5")	112 (4.4")	5 (0.2")	96 (3.8")	200 (7.9")

Dimensiones en milímetros ( pulgadas )

## APÉNDICE

### DANFOSS

#### VLT® 3500 HV-AC

##### ■ IP 21 / IP 54

###### 380 / 500 voltios (200 voltios)

Tipo VLT	3575-3600	3625-3700	3750-3800
	3542-3562 (200 voltios)		
A (mm)	954 con tuer. de anillo	1569 con tuer. de anillo 1696 con tuer. de anillo y zócalo opcional	1877 con zócalo y tuer. de anillo
B (mm)	506 con goznes	513 con goznes	513 con goznes
C (mm) IP 21	353	394	508
C (mm) IP 54	376	417	531
a (mm)	851	1453	para colocarlo sobre el zócalo
b (mm)	446	432	para colocarlo sobre el zócalo
Instalación en suelo sobre zócalo superior (mm)	-	230	260
Instalación sobre pared sup./inf. (mm)	170	230	-
Instalación en suelo sobre zócalo der./izq. (mm)	-	130	130
Instalación sobre pared der./izq. (mm)	25*)	25*)	25*)

\*) Limitado sólo por los goznes en los laterales.

Tenga en cuenta que la puerta se abre hacia la izquierda, mientras que la puerta opcional se abre hacia la derecha.

###### Armario de montaje IP 54

	3575-3600	3625-3700	3750-3800
A (mm)	900	1515	1695
B (mm)	267	305	349
C (mm)	388	427	554

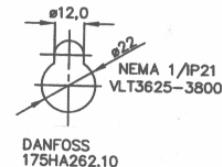
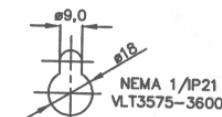
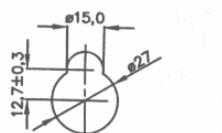
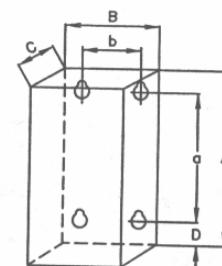
###### Placa interna en el armario de montaje IP 54

	3575-3600	3625-3700	3750-3800
A (mm)	845	1459	1640
B (mm)	229	267	311

###### Módulo RFI IP 21

	3575-3600	3625-3700	3750-3800
A (mm)	864	1168	1168
B (mm)	254	317	317
C (mm)	254	254	254
D (mm)	45	52	52
a (mm)	772	1063	1063
b (mm)	174	235	235

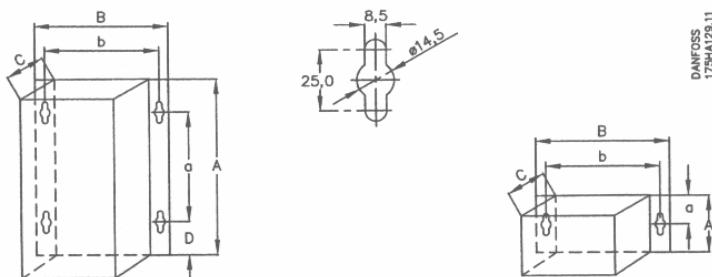
#### VLT® 3500 HV-AC



## APÉNDICE

### VLT® 3500 HV-AC

#### ■ IP 21



220 voltios

Tipo VLT	3502	3504	
A (mm)	360	390	
B (mm)	281	281	
C (mm)	178	178	
D (mm)	85	85	
a (mm)	191	191	
b (mm)	258	258	

Opciones	Módulo RFI
	Módulo de filtro RFI-LC
	Módulo LC
	Módulo clamp
A (mm)	115
B (mm)	281
C (mm)	178
a (mm)	57,5
b (mm)	258

380 / 500 voltios

Tipo VLT	3502-04	3505	3506	3508-11
A (mm)	360	390	500	530
B (mm)	281	281	281	281
C (mm)	178	178	178	178
D (mm)	85	85	85	85
a (mm)	191	191	330	330
b (mm)	258	258	258	258

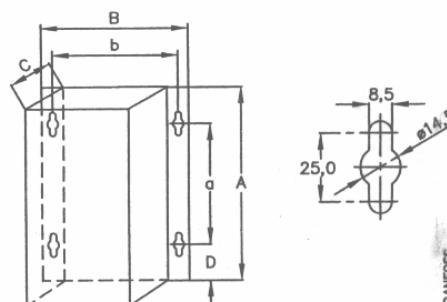
#### ■ IP 54

220 voltios

Tipo VLT	3502-04	3508-16	3522-32
A (mm)	530	810	940
B (mm)	281	355	400
C (mm)	178	280	280
D (mm)	85	70	70
a (mm)	330	560	690
b (mm)	258	330	375

380 / 500 voltios

Tipo VLT	3502-11	3516-32	3542-62
A (mm)	530	810	940
B (mm)	281	355	400
C (mm)	178	280	280
D (mm)	85	70	70
a (mm)	330	560	690
b (mm)	258	330	375



## APÉNDICE

---

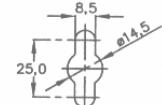
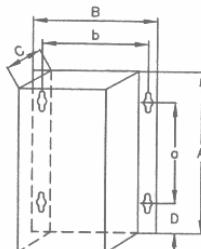
### VLT® 3500 HV-AC

#### ■ IP 00

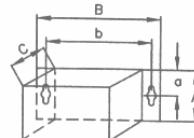
220 voltios

Tipo VLT 3502-3504

A (mm)	300
B (mm)	281
C (mm)	178
D (mm)	55
a (mm)	191
b (mm)	258



DANFOSS  
175HA129.11



380 / 500 voltios

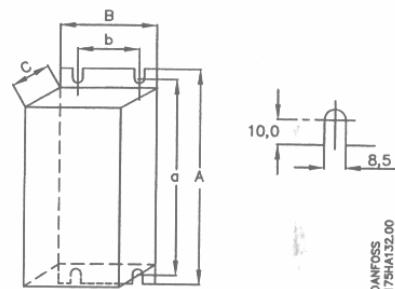
Tipo VLT	3502-05	3506-08	3511
A (mm)	300	440	500
B (mm)	281	281	281
C (mm)	178	178	178
D (mm)	55	55	55
a (mm)	191	330	330
b (mm)	258	258	258

Opciones	Módulo RFI
	Módulo de filtro RFI-LC
	Módulo LC
	Módulo clamp
A (mm)	115
B (mm)	281
C (mm)	178
a (mm)	57,5
b (mm)	258

#### ■ IP 20

220 voltios

Tipo VLT	3508-3511	3516	3522-3532
A (mm)	660	780	950
B (mm)	242	242	308
C (mm)	260	260	296
a (mm)	640	760	930
b (mm)	200	200	270



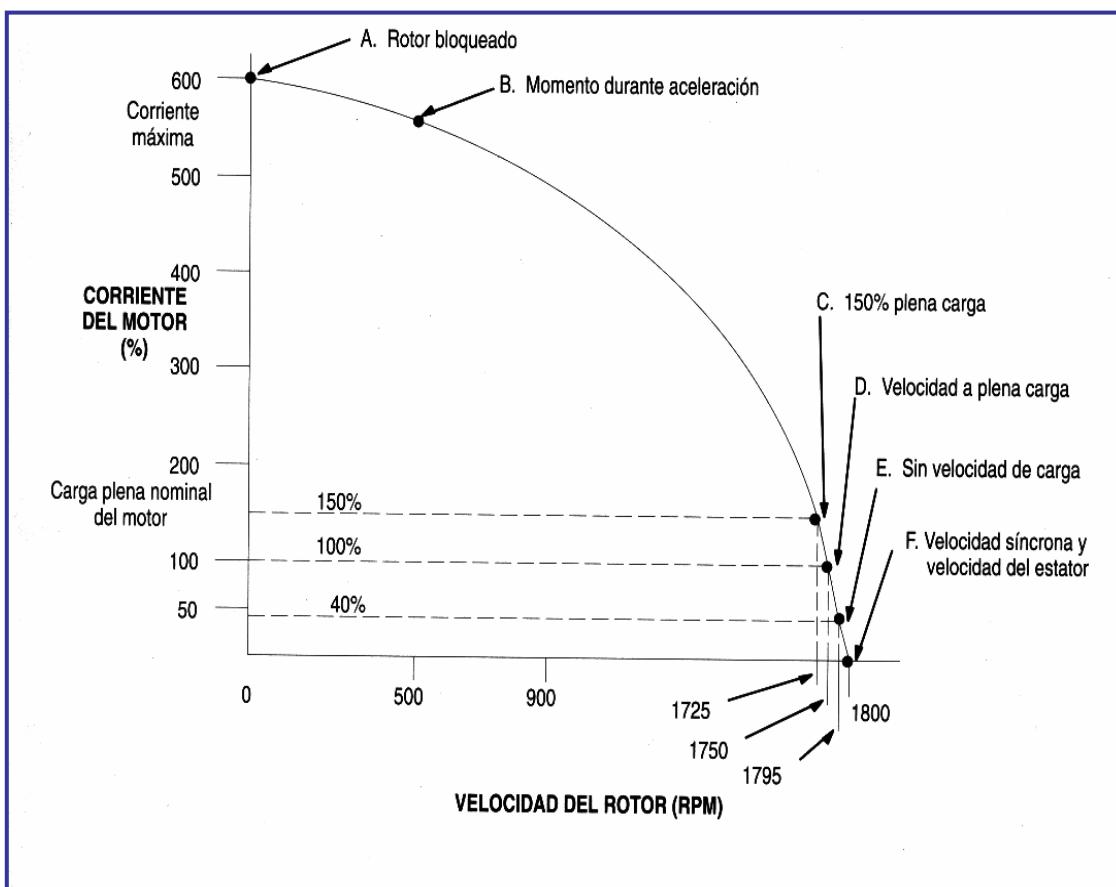
DANFOSS  
175HA132.00

380 / 500 voltios

Tipo VLT	3516-3522	3532	3542-3562
A (mm)	660	780	950
B (mm)	242	242	308
C (mm)	260	260	296
a (mm)	640	760	930
b (mm)	200	200	270

### Motores de Inducción.

Son aquellos motores cuyo principio de funcionamiento se basa en un conductor localizado en el rotor, el cual, influenciado por una fuerza electromagnética proveniente del estator, gira a la velocidad propia de éste. En el momento que el motor empieza a girar, su corriente es máxima, dando como resultado un fuerte campo magnético. La siguiente **Figura** muestra una gráfica de la corriente del motor en relación a la velocidad del rotor.



**Figura:** Relación de la corriente del motor y la velocidad del rotor en motores de Inducción.

Como se observa en la Figura 3.20, el rotor acelera desde la posición de descanso (punto "A"); el deslizamiento disminuye a medida que el rotor acelera y llega al punto de plena carga (punto C), lo cual sucede porque hay menos movimiento relativo entre el campo y

el conductor y por lo tanto, hay un voltaje inducido más bajo con menos corriente del rotor y un campo más débil del rotor. Si el rotor continúa acelerando, su corriente y campo magnético terminarán disminuyendo a cero (punto F), debido a que el rotor y el estator no pueden funcionar a la misma velocidad, por el principio de inducción. Si no hay carga aplicada, el rotor se ubica en el punto E, donde el deslizamiento es mínimo pero existe suficiente atracción de estator y rotor para producir un par suficiente que mantiene al rotor girando. Al aplicar una carga al motor, éste disminuirá su velocidad, hasta producir un par adecuado para activar la carga y mantener la rotación y subirá al punto D con mayor corriente y deslizamiento. Al retirar la carga volverá al punto E. La velocidad se estabiliza cuando el par del motor es igual al par de la carga.

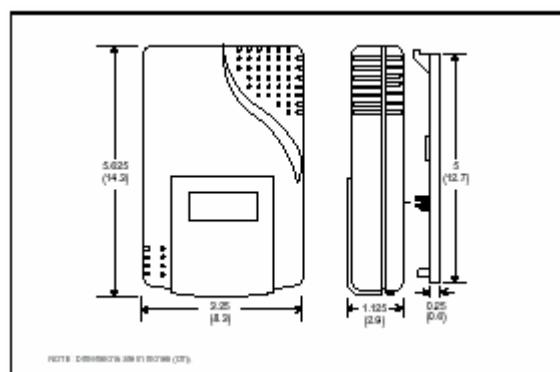
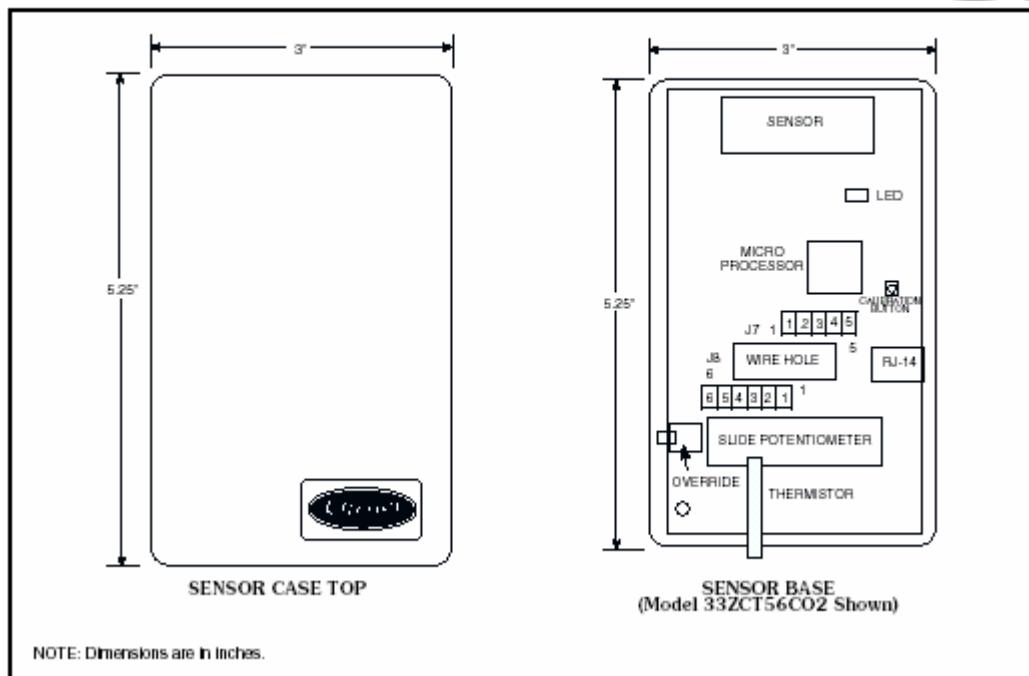
APÉNDICE F

SENSORES DE CO<sub>2</sub>

DIMENSIONES

CARRIER

Dimensions



## APÉNDICE

---

### APÉNDICE G

#### RATAS DE VENTILACIÓN RECOMENDADAS POR ASHRAE 62-89

APLICACIÓN	VENTILACIÓN RATA/PERSONA
Ambiente de oficinas	20 cfm
Restaurants	20 cfm
Bares	30 cfm
Salones de hotel	30 cfm
Salas de conferencias	20 cfm
Salas de hospital	25 cfm
Salas de operación	30 cfm
Salas de fumadores	60 cfm
Salones de belleza	25 cfm
Supermercados	15 cfm
Auditorios	15 cfm
Salones de clases	15 cfm
Laboratorios	20 cfm

## APÉNDICE H

### EQUIPOS DE MEDICIONES ELÉCTRICAS

#### **VIP<sub>MK3</sub>/ SYSTEM 3. ELCONTROL**

El analizador de magnitudes eléctricas VIP<sub>MK3</sub>/SYSTEM 3 es la unión del VIP y el micro VIP, efectúa medidas en las tres (3) fases de un sistema trifásico. Es un equipo portátil, de peso reducido, que incorpora una impresora de 40 columnas.

El VIP<sub>MK3</sub>/SYSTEM 3 puede medir 81 magnitudes eléctricas con una precisión muy elevada, efectúa lecturas de magnitudes menos tradicionales para un instrumento de este tipo: mide potencia de distorsión, valores medios, memoriza valores máximos, mide e imprime consumos de energía activa y reactiva, registra las microinterrupciones por alimentación y la duración de las interrupciones más largas.

El kit comprende además del instrumento, una serie de cables para las conexiones voltmétricas, tres pinzas amperimétricas y algunos materiales de consumo.

El equipo está listo para efectuar medidas de energía eléctrica en instalaciones de baja tensión (hasta 600 voltios entre fase y neutro) con corrientes de fase hasta 1000 amp.

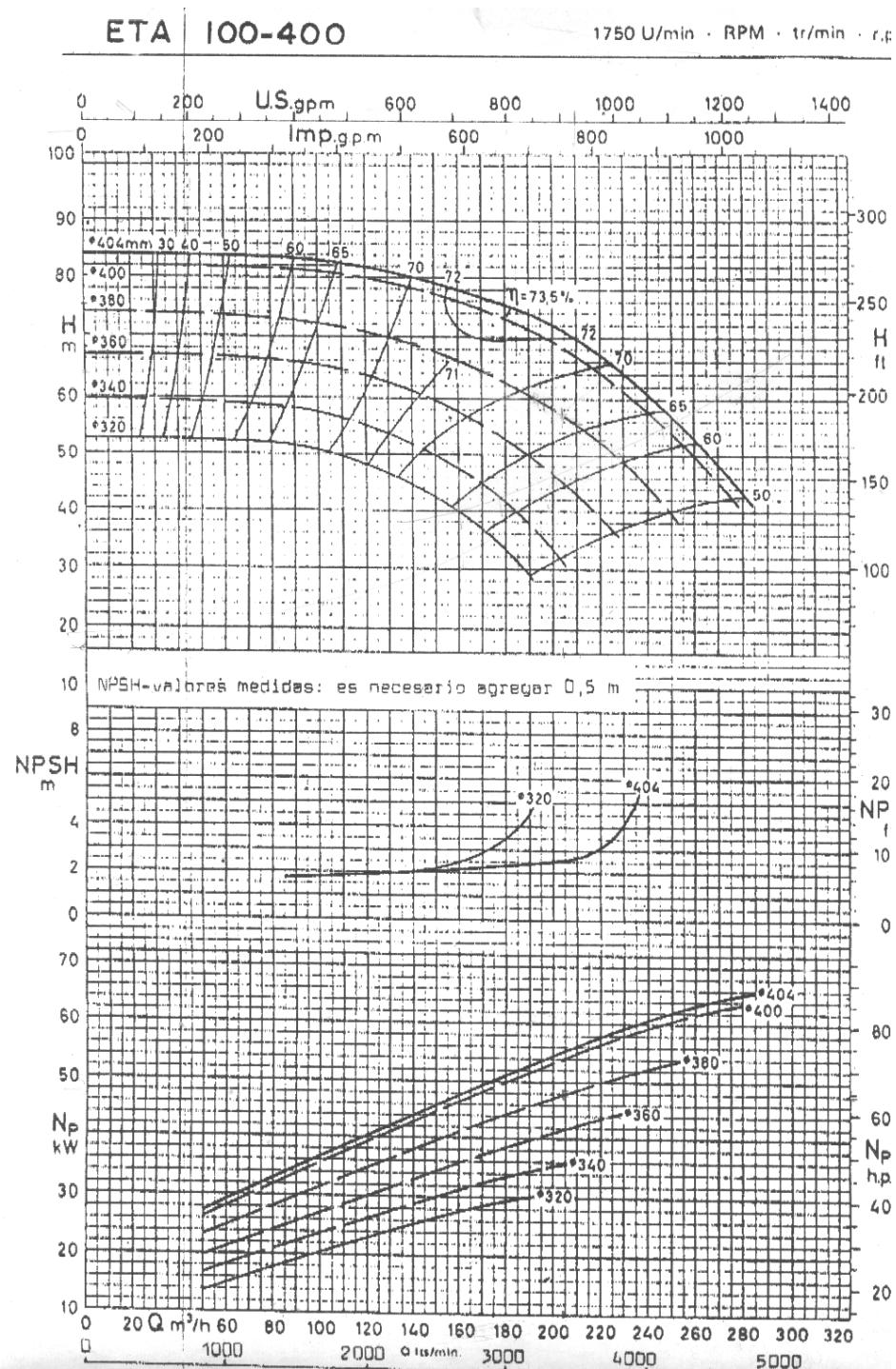
El encendido del instrumento da inicio inmediato al ciclo de las medidas y en el display aparece la primera página de medidas correspondientes a los valores trifásicos de tensión, corriente, potencia activa y cos  $\Phi$

#### **DRANETZ BMI**

El analizador de energía portátil PP-4300- Dranetz BMI, está disponible en modelos de una fase o tres fases, pesa menos de cuatro (4) libras, tiene ocho (8) canales, cuatro (4) de voltaje y cuatro (4) de corriente. Utiliza sistema operativo TASKCard tecnología patentada; mide calidad de potencia, armónicos y energía con TASKCard PQ Lite. Presenta (opcional) una tarjeta de memoria de interfaz integral para PC y un software para análisis en PC y escritura de informe.

**APENDICE I**

**CURVA CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA DE AGUA HELADA DEL EDIFICIO ANEXO LA HOYADA.**



## APÉNDICE

---

### APÉNDICE J

#### CARACTERÍSTICAS DE LOS GENERADORES DE AGUA HELADA DEL EDIFICIO ANEXO LA HOYADA.

CV A C 013 B N	L A1 5 F 1 A A B 0 0 0
CENTRAVAC	
AIR-COOL GEAR DRIVE	
DEVELOPMENT SEQUENCE	
NOMINAL CAPACITY	
013 = 130 Ton	
016 = 160 Ton	
018 = 180 Ton	
021 = 210 Ton	
027 = 270 Ton	
* 032 = 320 Ton	
NOMINAL VOLTAGE	
A = 200 Volt 60 Hz	
B = 460 Volt 60 Hz	
C = 575 Volt 60 Hz	
D = 400 Volt 50 Hz	
UNIT TYPE	
* N = Non-heat recovery	
R = Heat Recovery	
DESIGN SEQUENCE*	
AMBIENT	
* N = Nominal 20 to 115 F	
L = Low -20 to 115 F	
H = High 20 to 125 F	
EVAPORATOR	
A3 = 013 Standard	
A2 = 016 Standard	
A1 = 013, 016 Ext. Cap.; 013 Hi Eff; 013 Hi Amb.	
B3 = 018 Standard	
B2 = 021 Standard	
B1 = 018, 021 Ext. Cap.; 016, 018 Hi Eff; 016, 018 Hi Amb.	
C2 = 027 Standard	
C1 = 027 Ext. Cap.; 021 Hi Eff; 021 Hi Amb.	
* D2 = 032 Standard	
D1 = 032 Ext. Cap.; 027 Hi Eff; 027 Hi Amb.	
*Factory Assigned G	
HT. REC. COND. WORKING PRESSURE	
0 = Non-heat recovery units *	
1 = 150 lb.	
2 = 300 lb.	
HT. REC. COND. PASS ARRANGEMENT	
0 = Non-heat recovery units *	
4 = All heat recovery units	
STARTER	
A = with California Code	
B = without California Code	
CONDENSER FINS	
* A = Aluminum	
C = Copper	
CONDENSER	
A = 013 Standard, Ext. Cap.	
B = 016 Standard, Ext. Cap.; 013 Hi Eff, Hi Amb.	
C = 018 Standard, Ext. Cap.; 016 Hi Eff, Hi Amb.	
D = 021 Standard, Ext. Cap.; 018 Hi Eff, Hi Amb.	
E = 027 Standard, Ext. Cap.; 021 Hi Eff, Hi Amb.	
* F = 032 Standard, Ext. Cap.; 027 Hi Eff, Hi Amb.	
EVAPORATOR WORKING PRESSURE	
1 = 150 lb. *	
2 = 300 lb.	
EVAPORATOR PASS ARRANGEMENT	
F = Front *	
R = Rear	
EVAPORATOR PASSES	
2 = 2 Pass	
3 = 3 Pass	
* 4 = 4 Pass	
5 = 5 Pass	
6 = 6 Pass	

## APÉNDICE

---

TABLE 26-1 — Standard and Extended Capacity Units

MODEL	UNIT CHARACTERISTICS <sup>1</sup>					COMPRESSOR					CONDENSER FAN MOTORS		
	RATED VOLTAGE	Hz	VOLTAGE UTILIZATION RANGE	MINIMUM CIRCUIT AMPACITY <sup>2</sup>	CIRCUIT BREAKER TRIP <sup>3</sup>	NAMEPLATE RATED LOAD AMPS	LOCKED ROTOR AMPS <sup>4</sup>	FULL LOAD KW	HP	NUMBER	NAMEPLATE FULL LOAD AMPS EACH	ACTUAL KW EACH	HP
CVAC-013 Standard Ext. Cap.	200	60	180-220	857	900	593	3560	182	260	2	48.3	8.3	15
	400	50	360-440	434	400	300	1902	182	260	2	24.7	8.3	15
	460	60	414-506	372	400	257	1650	182	260	2	21.0	8.3	15
	575	60	517-632	298	300	206	1360	182	260	2	17.0	8.3	15
CVAC-016 Standard Ext. Cap.	200	60	180-220	921	900	644	3560	208	260	2	48.3	9.9	15
	400	50	360-440	465	400	325	1902	208	260	2	24.7	9.9	15
	460	60	414-506	400	400	280	1650	208	260	2	21.0	9.9	15
	575	60	517-632	321	350	224	1360	208	260	2	17.0	9.9	15
CVAC-018 Standard Ext. Cap.	200	60	180-220	1074	1200	745	4270	230	290	2	62.1	12.5	20
	400	50	360-440	543	600	375	2099	230	290	2	32.5	12.5	20
	460	60	414-506	467	500	324	1945	230	290	2	27.0	12.5	20
	575	60	517-632	374	400	259	1600	230	290	2	22.0	12.5	20
CVAC-021 Standard Ext. Cap.	200	60	180-220	1224	1200	865	5200	266	330	2	62.1	15.5	20
	400	50	360-440	602	700	422	2516	266	330	2	32.5	15.5	20
	460	60	414-506	532	600	376	2130	266	330	2	27.0	15.5	20
	575	60	517-632	427	500	301	1650	266	330	2	22.0	15.5	20
CVAC-027 Standard Ext. Cap.	200	60	180-220	1445	1800	1025	6210	325	410	3	48.3	11.5	15
	400	50	360-440	742	800	527	3014	325	410	3	24.7	11.5	15
	460	60	414-506	640	700	455	2560	325	410	3	21.0	11.5	15
	575	60	517-632	513	500	364	2010	325	410	3	17.0	11.5	15
CVAC-032 Standard Ext. Cap.	200	60	180-220	1630	1600	1140	7060	368	470	3	62.1	13.5	20
	400	50	360-440	851	900	595	3537	368	470	3	32.5	13.5	20
	460	60	414-506	732 <sup>3</sup>	800	514 <sup>3</sup>	3080	368	470	3	27.0	13.5	20
	575	60	517-632	586	600	411	2460	368	470	3	22.0	13.5	20

Electrical Data Notes

- Unit Characteristics refer to entire unit main power supply. All unit amps include power for oil pump and controls. Units require separate source 230-volt, single-phase power supply as follows:

Voltage	Hz	Minimum Circuit Ampacity <sup>1</sup>	Recommended Delay Fuse	Number of Supply Wires
230	60	64 amps	70 amps	3-wire
230	50	64 amps	70 amps	2-wire

<sup>1</sup>Minimum Circuit Ampacity per NEC 424.3(b)

<sup>2</sup>Minimum circuit ampacity per NEC 440-33

<sup>3</sup>Circuit breaker trip sized at approximately 150 to 175 percent of compressor rated load amps per NEC 440-22(a)

<sup>4</sup>Locked rotor amps in delta connection



## APÉNDICE

---

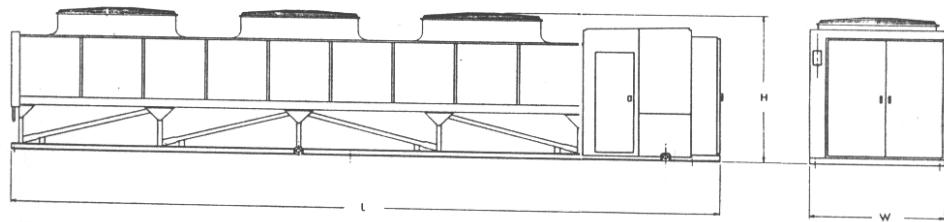
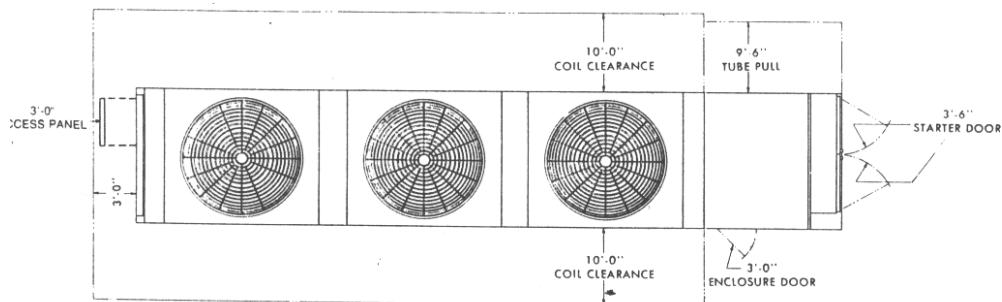


TABLE 34-1 Dimensions

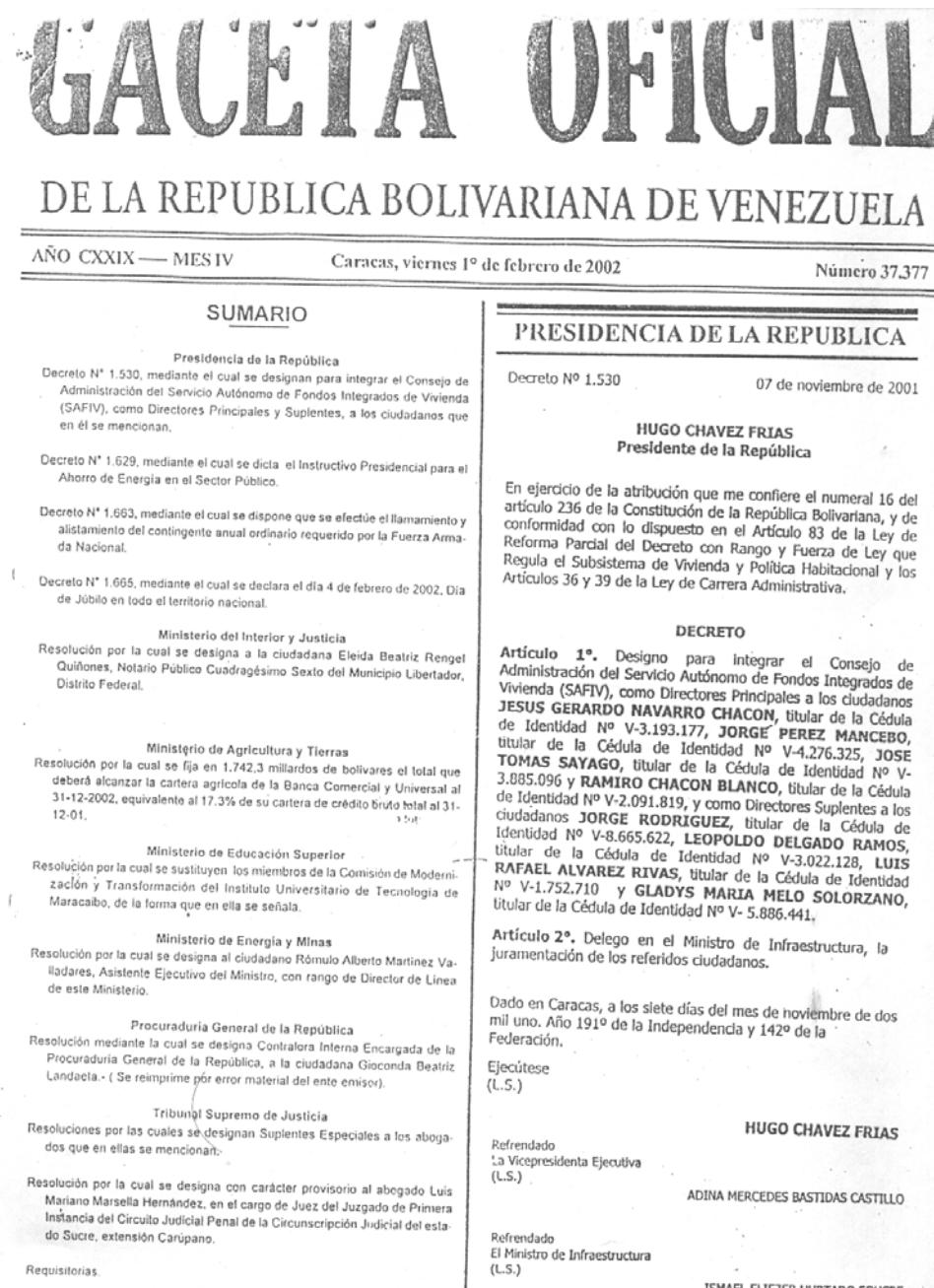
MODEL	DIMENSIONS (ft/in.)		
	LENGTH L	WIDTH W	HEIGHT H
CVAC-021 C1-E (Hi. Eff.)			
CVAC-021 C1-E (Hi. Amb.)			
CVAC-027 C2-E (Standard)			
CVAC-027 C1-E (Ext. Cap.)	41 - 1 1/8	8 - 0	8 - 6
CVAC-027 D1-F (Hi. Eff.)			
CVAC-027 D1-F (Hi. Amb.)			
CVAC-032 D2-F (Standard)			
CVAC-032 D1-F (Ext. Cap.)	41 - 1 1/8	8 - 0	8 - 7 1/2

All dimensions are approximate for roughing in purposes only. Certified dimensions available on request.  
Two, four and six-pass arrangements have same side connections. Three and five-pass arrangements have one connection on each side.

## APÉNDICE

### APÉNDICE K

#### DECRETO PRESIDENCIAL SOBRE AHORRO DE ENERGÍA



## APÉNDICE

Decreto N° 1.629

31 de diciembre de 2001

HUGO CHAVEZ FRIAS  
Presidente de la República

En ejercicio de las atribuciones que le confiere el artículo 226 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela y en concordancia con lo dispuesto en los artículos 19, 20 y 47 de la Ley Orgánica de la Administración Pública,

### CONSIDERANDO

Que en la actualidad concurren una serie de factores que podrían conducir a una situación de déficit de energía eléctrica en el futuro, entre los cuales se destaca el alto crecimiento anual de la demanda de energía eléctrica, el intenso y largo periodo de sequía que podría limitar la capacidad de la Central Hidroeléctrica Guri, nuestra principal fuente de generación, y que existen evidencias a nivel hidrometeorológico de que en el año 2002 esta situación persistirá,

### CONSIDERANDO

Que la participación del sector público representa aproximadamente un 13% de la demanda de energía eléctrica a nivel nacional,

### CONSIDERANDO

Que resulta de gran importancia que el Gobierno Nacional lidere una campaña de ahorro de energía eléctrica, realizando acciones concretas y de obligatorio cumplimiento que produzca un efecto multiplicador en todas y cada una de las instancias del Estado,

### CONSIDERANDO

Que el Ministerio de Energía y Minas está actualmente ejecutando un Programa de Ahorro de Energía Eléctrica, que debe ser acatado por todos los agentes en el Sector público,

### CONSIDERANDO

Que de no adoptarse medidas especiales que permitan utilizar racionalmente los recursos energéticos, se pone en grave riesgo la continuidad del suministro eléctrico a nivel nacional con los consiguientes perjuicios en lo económico y lo social,

### DICTA

el siguiente,

### INSTRUCTIVO PRESIDENCIAL PARA EL AHORRO DE ENERGIA EN EL SECTOR PUBLICO

**Artículo 1º.** Todos los Ministerios y demás órganos de la Administración Pública Central deberán ejecutar un Programa de Ahorro de Energía Eléctrica para reducir en un veinte por ciento (20%) su consumo eléctrico en el período de un año

contado a partir de la entrada en vigencia de este Decreto, tomando como referencia el consumo registrado durante el año 2001. Dicho porcentaje será ejecutado en dos (2) etapas con una duración de seis (6) meses cada una, en la primera etapa se deberá lograr un ahorro del diez por ciento (10%) y en la segunda del diez por ciento (10%) restante. En tal sentido, se exhorta a los Estados y Municipios, así como a los Institutos Autónomos, Empresas del Estado y demás Entes Descentralizados a reducir su consumo eléctrico en los términos expuestos.

**Artículo 2º.** El Programa de Ahorro de Energía Eléctrica se iniciará con la designación por parte de los Ministros o funcionarios de alto nivel, de un funcionario que tendrá bajo su responsabilidad dicho programa en la dependencia pública a la cual esté adscrito y servirá de enlace con el Ministerio de Energía y Minas a los fines de coordinar y aplicar las acciones y medidas que éste adopte.

La designación y los datos de ubicación del funcionario de enlace deberán ser notificados al Ministerio de Energía y Minas, a través de la Dirección General de Energía, en un lapso no mayor de cinco (5) días hábiles contados a partir de la entrada en vigencia del presente Decreto.

**Artículo 3º.** Los Ministerios que tengan bajo su tutela o adscripción, empresas industriales o de servicio altamente consumidoras de energía eléctrica, deberán designar igualmente un enlace para proceder a incorporarlos a otros programas que el Ministerio de Energía y Minas ha diseñado y están en ejecución para el ahorro en el sector industrial y de servicios.

**Artículo 4º.** Si la magnitud de la institución pública de que se trate y el número de edificaciones que posea, hace necesaria la presencia de más de un funcionario de enlace, éste formará y coordinará un equipo que permita atender todas las edificaciones en uso por parte de la institución, y le deberá informar al Ministerio de Energía y Minas los nombres de los funcionarios que conformen dicho equipo, indicando los datos para su ubicación.

**Artículo 5º.** Mientras el Grupo Técnico del Ministerio de Energía y Minas diseña las actividades y los mecanismos de control para evaluar la ejecución del presente Decreto, el funcionario de enlace designado y su equipo de trabajo deben iniciar actividades operativas dirigidas a disminuir el consumo de energía eléctrica de los principales sistemas, tales como aires acondicionados, iluminación en general, motores y otros equipos, así como realizar una intensa gestión de información y difusión. También debe iniciarse un proceso de recopilación de información sobre la evolución del consumo de energía eléctrica. Para la ejecución de estas actividades podrán recibir el apoyo técnico del Ministerio de Energía y Minas.

**Artículo 6º.** El funcionario de enlace, a los fines de implantar medidas de carácter estructural tales como la sustitución de equipos, automatización de sistemas y otras similares, deberá evaluar la capacidad técnica de la institución con profesionales de la Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica, o profesiones afines para atender el reto del ahorro de energía eléctrica, orientar unas primeras acciones y apoyar los programas que ejecute el Ministerio de Energía y Minas.

De no poseer a nivel interno la experticia indicada, se deberán hacer las previsiones presupuestarias pertinentes para la contratación de consultores que les asistan técnicamente en la

## APÉNDICE

Evaluación del problema, determinación de prioridades y capacitación del personal. A tales efectos el Ministerio de Energía y Minas mantendrá actualizado y a la disposición de los funcionarios de enlace, un registro de consultores y de información de las unidades técnicas especializadas en las principales Universidades del país.

**Artículo 7º.** Las empresas eléctricas deberán suministrar a los funcionarios de enlace designados, la información y orientación sobre la evolución del consumo de las instituciones y otros datos de interés sobre la eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

**Artículo 8º.** El Ministerio de Energía y Minas deberá proporcionar a los funcionarios de enlace el material informativo, los manuales técnicos, cursos de capacitación y toda la asistencia técnica necesaria a objeto de garantizar la eficacia y sostenibilidad de las medidas adoptadas.

**Artículo 9º.** El Ministro de Energía y Minas queda encargado de la ejecución del presente Decreto.

Dado en Caracas, a los treinta y un días del mes de diciembre de dos mil uno. Años 191º de la Independencia y 142º de la Federación.

Ejecútese  
(L.S.)

HUGO CHAVEZ FRIAS

Refrendado  
La Vicepresidenta Ejecutiva  
(L.S.)

ADINA MERCEDES BASTIDAS CASTILLO

Refrendado  
El Ministro de Energía y Minas  
(L.S.)

ALVARO SILVA CALDERON

Decreto N° 1.663

31 de enero de 2002

HUGO CHAVEZ FRIAS  
Presidente de la República

En ejercicio de la atribución que le confiere el numeral 5 del artículo 236 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, en concordancia con lo dispuesto en los artículos 7º y 9º de la Ley de Conscripción y Alistamiento Militar,

### CONSIDERANDO

Que es un deber constitucional renovar el contingente anual ordinario que cumple el servicio militar en la situación de actividad en la Fuerza Armada Nacional,

### DECRETA

**Artículo 1º.** Efectúese el llamamiento y alistamiento del contingente anual ordinario requerido por la Fuerza Armada Nacional.

**Artículo 2º.** Constitúyase el contingente anual ordinario del año 2002, de acuerdo con el siguiente orden de prelación:

1. Los Renuentes;
2. Los excedentes del contingente anual ordinario de 1998;
3. Los voluntarios entre 18 y 30 años de edad;
4. Los diferidos, cuya causa de diferimiento haya cesado; y,
5. Los elegibles de las clases de 2001, 2000, 1999, 1998, 1997, 1996, 1995, 1994, 1993, 1992, 1991, 1990. Estos ciudadanos serán aportados por las Entidades Federales en la proporción que al efecto se les asigne.

**Artículo 3º.** Los gastos que ocasiona el cumplimiento de este Decreto, serán por cuenta de las autoridades señaladas en la Ley de Conscripción y Alistamiento Militar y su Reglamento.

**Artículo 4º.** Los Ministros del Interior y Justicia y, de la Defensa quedan encargados de la ejecución del presente Decreto.

Dado en Caracas, a los treinta y un días del mes de enero de dos mil dos. Años 191º de la Independencia y 142º de la Federación.

Ejecútese.  
(L.S.)

HUGO CHAVEZ FRIAS

Refrendado  
El Ministro del Interior y Justicia  
(L.S.)

LUIS MIQUELENA

Refrendado  
El Ministro de la Defensa  
(L.S.)

JOSE VICENTE RANGEL

Decreto N° 1.665

1º de febrero de 2002

HUGO CHAVEZ FRIAS  
Presidenta de la República

De conformidad con lo establecido en el artículo 226 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela y en ejercicio de la atribución que le confiere el numeral 2 del artículo 236 ejusdem,

### CONSIDERANDO

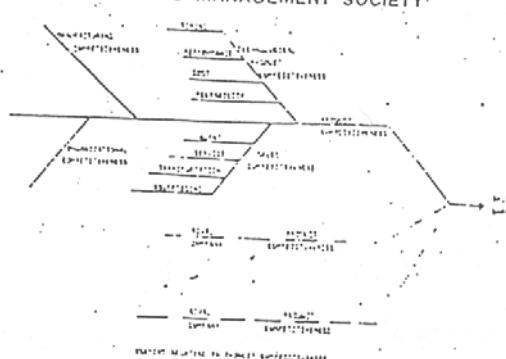
Que el 4 de febrero de 1992 hombres del pueblo venezolano organizados con miembros de la Fuerza Armada Nacional, dieron sus vidas convencidos de alcanzar una sociedad justa, basada en los principios de igualdad y libertad,

## APÉNDICE

---

### APÉNDICE L

#### METODO DE DECISIÓN MULTIPLE BINARIA

<b>ENGINEERING MANAGEMENT</b>	
MAY 1985	VOLUME EM-32
NUMBER 2	
(ISSN 0018-9391)	
A PUBLICATION OF THE IEEE ENGINEERING MANAGEMENT SOCIETY	
	
ABOUT THIS ISSUE .....	
PAPERS	
Evaluating Social Benefits of Forestry Research Programs .....	A. H. Rubenstein, Editor 45
Value Analysis Method for the Evaluation of Telecommunication Systems Bid Proposals .....	R. Z. Callahan 47
valuation Method for Engineering Activity through Comparison with Competition—Four Years' Experience .....	C. A. Moretti 53
F. Yukel 63	
SPECIAL SECTION: PAPERS FROM THE IEEE ENGINEERING MANAGEMENT CONFERENCE, WASHINGTON, JUNE 1982	
The Role of Structural Factors in Determining Project Management Success .....	R. J. Might and W. A. Fischer 71
SPECIAL SECTION: PAPERS FROM THE WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE CONFERENCE, WASHINGTON, MAY 1983	
R&D Management Strategies: America versus Japan .....	F. Hull, J. Hage, and K. Azumi 78
Strategic Planning for Investment in R&D Using Decision Analysis and Mathematical Programming .....	G. R. Modry and R. V. Dean 84
Ability of Communication Flow in R&D Organizations .....	P. Sullo, T. Triscori, and W. A. Wallace 91
CALL FOR PAPERS	
1 Nonstrand Reinhold Series on "Managerial Skills in Engineering and Science" .....	98
Items of Journal of Management Studies, Vol. 22, No. 1, January 1985 .....	99
Items of Journal of the Society of Research Administrators, Vol. XVI, No. 3, Winter 1983 .....	100
Items of Research Management, Vol. XXVII, No. 6, Nov.-Dec. 1984, and Vol. XXVIII, No. 1, Jan.-Feb. 1985 .....	101
ABOUT THE AUTHORS .....	
RELATED SOCIETIES—IEEE ENGINEERING MANAGEMENT SOCIETY .....	
INFORMATION FOR AUTHORS .....	

A "proposal value"  $V_i$  is obtained for each proposal by the linear combination of the  $a_{ij}$ 's and the  $w_j$ 's. The proposal value  $V_i$  of proposal  $P_i$  is calculated as follows:

$$V_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (3)$$

The proposal with the highest proposal value  $V_{\max}$  can then be selected as the "best" technical proposal. However, in most instances the proposal value  $V_i$  is used to ponder the cost proposal in order to obtain a "weighted cost." A typical form for weighting proposal costs follows:

$$CIV_i = \frac{C_i}{1 - k(1 - V_i)} \quad (4)$$

where  $k$  cost weighting factor, for  $0 \leq k < 1$ , and  $C_i$  unweighted proposal cost.

Thus if  $k = 0.1$ , the value of  $CIV_i$  can increase from  $C_i$  up to  $C_i + 10$  percent. Finally, the proposal  $P_i$  with the lowest weighted cost  $CIV_{\min}$  should be selected as the successful proposal.

Therefore, by weighing the importance of the relevant attributes, the selection of proposals can be based not only on the cost, but also on attributes' weights which may otherwise be difficult to quantify in monetary terms. However, this method presents two major problems to the buyer.

1) The assignment of weights ( $w_j$ ) to  $n$  attributes requires a simultaneous decision on  $n$  different values, giving due attention to the weight relationship between each possible pair of attributes. Considering that  $n$  might be of the order of 10, 20, or 100, this task is liable to render unreliable results. Even though a team effort might result in a weight distribution obtained by consensus of a large group of evaluators, it is still difficult to objectively justify each weight value and the value relationships among them.

2) For each attribute  $A_j$  of each proposal  $P_i$ , a value  $a_{ij}$  has to be chosen. This is also a difficult task in terms of objectivity, because the evaluation team has to scale various values, sizes, performances, or qualities into a fixed scale, i.e., from 0 to 1, or equivalent, and this cannot be done before the proposals are read. Thus value judgments are introduced during the evaluation process. This method also presents a serious problem to the bidders:

The selection of values  $a_{ij}$  is made during the evaluation process and value judgments not previously defined in the bid documents are incorporated. Thus bidders are inhibited from submitting the most appropriate proposal.

#### (4) MULTIPLE BINARY-DECISION METHOD (MBDM)

The major problems with the "weighted attributes" method lie then in 1) the simultaneous assignment of  $n$  weight values, 2) the difficulty of quantifying performances to assign the values  $w_j$ , and 3) the insertion of value judgments after the evaluation process has started. One alternative to overcome these difficulties is to allow the evaluators to express preferences over isolated pairs of attributes in the form of simple binary decisions of the type "better/worse" or "greater/

smaller." A similar technique has been used for the selection of mechanical parts and for the selection of subsystems design [10], [11]. This technique leads to the multiple binary decision method. In this method, the attributes are also weighted according to their degree of importance, but the weight values are obtained and used differently from the weighted attribute method.

The steps taken in applying the binary decision method are described in the following paragraphs.

During drafting of the bid documents and prior to publication, the following steps are taken.

Step 1: The buyer must decide what are the relevant attribute of the equipment/systems to be procured that will influence the selection, and then list them by name; for example, subscriber loop resistance; traffic capacity; ticketing information; dc power drain. This step is crucial because it forces a decision on which properties, qualities, and characteristics have to be considered in addition to those that are minimum requirements.

Step 2: The buyer must obtain objective definitions of the performance criteria of each attribute. These definitions must be measurable to make possible objective comparisons of equipment performances during the evaluation process. For example:

- 1) loop resistance: the largest possible loop resistance of the subscriber circuits,
- 2) blocking: the lowest possible blocking probability, at a given traffic load,
- 3) dc power: the lowest dc power drain per line during the busy hours (or at a specified traffic load).

Step 3: An  $n \times n$  decision matrix must be drawn in which  $n$  represents the number of attributes. If only six attributes are considered relevant, the decision matrix will look like the one shown below.

$A_k$						Weight	Normalized Weight Value ( $w_i$ )
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$\Sigma$ -value	
0	0	0	1	1	1	3	0.200
1	0	1	1	1	1	3	0.333
1	0	0	1	1	1	4	0.267
0	0	0	0	1	0	1	0.067
0	0	0	0	0	0	0	0.000
0	0	0	1	1	0	2	0.133
						15	1.000

Each attribute is compared to each other attribute individually, and the following question must then be answered:

Is attribute  $A_i$  more or less important (or preferred) than attribute  $A_k$ ?

The answer can be symbolically expressed as:

$$A_i > A_k$$

or

$$A_k < A_i$$

## APÉNDICE

TABLE I  
MAXIMUM WEIGHT AS A FUNCTION OF THE NUMBER OF ATTRIBUTES

No. of attributes (n)	Maximum weight ( $w_n$ )
2	1.000
3	0.666
4	0.500
5	0.400
6	0.333
7	0.286
8	0.250
9	0.222
...	...
n	...

TABLE II  
DECISION MATRICES

		For attribute $A_1$					For attribute $A_2$					For attribute $A_3$					For attribute $A_4$										
		$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{15}$	$P_{16}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{25}$	$P_{26}$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$P_{35}$	$P_{36}$	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$	$P_{45}$	$P_{46}$		
$P_{11}$	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{12}$	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{13}$	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{14}$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{15}$	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{16}$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{21}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$P_{22}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$P_{23}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$P_{24}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$P_{25}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$P_{26}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$P_{31}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{32}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{33}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{34}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{35}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{36}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{41}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{42}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{43}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{44}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{45}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{46}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

where the symbol  $>$  means "is more important than" or "is preferred to" [12]. In case the decision is  $A_i > A_j$ , the answer is recorded in the decision matrix with a one (1) in row  $i$ , column  $k$ , and a zero (0) in row  $k$ , column  $i$ . In the example above, the decisions made were as follows:

$$\begin{aligned} A_1 &< A_2 \quad A_2 > A_3 \quad A_1 > A_4 \vee A_4 > A_5 \quad A_3 > A_6 \\ A_1 &< A_3 \quad A_3 > A_4 \quad A_3 > A_5 \vee A_4 < A_6 \\ A_1 &> A_4 \quad A_3 > A_5 \quad A_3 > A_6 \\ A_1 &> A_5 \quad A_3 > A_6 \\ A_1 &> A_6 \end{aligned}$$

The elements of the diagonal ( $i, i$ ) are meaningless and are filled with zeros. A weight value is then obtained for each attribute  $A_i$  by adding the number of 1's in row  $i$ . Then, a normalized weight coefficient  $w_i$  is also calculated for each attribute  $a_i$ . The values  $w_i$  represent the weights the buyer assigned to the attributes by determining preferences or relative importance values among them. Thus by breaking down the process into many binary decisions, the weights  $w_i$ 's obtained represent the degree of importance the evaluators have assigned to each attribute.

The maximum value  $w_i$  that any attribute can reach is determined by the total number of attributes being considered. Table I shows the maximum weight as a function of the number of attributes. Hence, when the number of attributes is very large, e.g., 50 or 100, no one attribute can attain a significant weight as large as 0.2 or 0.4. In some instances, it may be necessary to have a large number of attributes, e.g., 50 or 100, and it may also be desirable to assign to one specific attribute  $A_i$  (e.g., the cost) a larger weight  $w_i$ . In such a case, the  $n$  attributes can be grouped in a small number of clusters, e.g., all traffic-related attributes would be grouped in one cluster, called traffic. Another, called line circuit, might group all attributes related to the subscriber line requirements. This approach reduces the dimensionality of the problem [13]. Thus instead of calculating the values of isolated attributes, the procedure calls for the evaluation of the clusters. In this case, the specific attribute  $A_i$ , which has to have a high value of  $w_i$ ,

is assigned to a cluster that contained no other attribute. This  $A_i$  would obtain a value of  $w_i$  according to Table I. Similarly, the method can be adapted to suit other particular situations without changing the basis of the method. However, for purposes of this paper a simpler case is used to illustrate the method.

**Step 4:** The buyer must list all attributes, define the performance criteria, and calculate their emphasis coefficient prior to publication of the bid documents. This information can be conveniently included as part of the bid document since it provides the rules by which the proposals will be evaluated.

When the proposals are received by the buyer, opened, and read, the following steps are taken in the evaluation process:

**Step 5:** A decision matrix must be formed for each attribute. The decision matrices are square matrices of size  $m$ , corresponding to the number of proposals. Hence, each row  $j$  and each column  $j$  represent a proposal  $P_j$ . Let us assume that the number of proposals is five and the number of attributes considered relevant is six (as in Step 3). Then, six decision matrices of  $5 \times 5$  would have to be formed. They might look like the ones shown in Table II.

The values of the matrices are obtained by making the following type of binary decisions:

In relation to attribute  $A_i$ , is  $P_j > P_k$ ; or is  $P_k > P_j$ ?

After forming the decision matrices, the normalized

## APÉNDICE

TABLE III FIGURES OF MERIT AND RANKING FOR FIVE PROPOSALS									
Attribute	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Proposal Priority ( $P_j$ )	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
Product of $w_i \times E_{Pj}$ = 0.333 = 0.4									
Emphasis coefficient of proposal $P_j$ : Attribute 3									
Proposal $P_1$ received the highest figure of merit (FOM). If the FOM is used to weight the original unweighted costs, an expression similar to (4) can be used for this purpose.									

emphasis coefficients  $E_{Pj}$  are obtained and listed next to the decision matrices. The coefficients  $E_{Pj}$  are the normalized values of the sum of each row of each decision matrix. Each of them represents the performance of proposal  $P_j$  regarding the  $i$ th attribute.

Step 6: Next, it is necessary to calculate the figure of merit FOM  $M(P_j)$  for each proposal  $P_j$ . They are calculated as follows:

$$M(P_j) = \sum_{i=1}^n w_i \times E_{Pj}$$

The weights  $w_i$  of the attributes were obtained in Step 3. The emphasis coefficients  $E_{Pj}$  were obtained in Step 5. The weighted value of each emphasis coefficient is obtained by multiplying  $w_i \times E_{Pj}$ .

The values of the figures of merit  $M(P_j)$  are shown in the right-hand column of Table III (values are rounded numbers).

### APPLICATIONS

The multiple binary decision method was successfully applied in Puerto Rico since 1974 on several occasions and in different manners for the evaluation of bid proposals for the procurement of telecommunications equipment. The author found that the greatest benefit was derived from the method when it was applied as described in Steps 1-6 above. A real case example in which the buyer wanted to include the original unweighted cost as one of the attributes is briefly described here.

The example relates to the procurement of switching equipment for local telephone offices, 10,000 lines, of the analog stored programmed control type. The bid specification stated a number of minimum requirements the proposed equipment had to meet. Only those proposals meeting all minimum requirements were further evaluated. The buyer selected 70 attributes for which performance criteria were clearly established and were deemed important in the selection of the best proposal. One of the 70 attributes was the original

unweighted proposal cost to which the buyer wished to assign a weight of no less than 30 percent. This was done by combining the attributes into six groups in light of the procedure described above, and the results of Table I, resulting in a weight of 33 percent. Cost became Group (1) with only one attribute. The 69 remaining attributes were split into five additional groups, as follows.

Group (2)—Switching: Eleven attributes, such as loss, resistance, dial speed, toll and local ticketing information classes of services, intercept facilities, expandability, floor loading and space, line protection, etc.

Group (3)—Transmission: Nine attributes, such as office losses, office impedance, noise levels, etc.

Group (4)—Maintenance: Thirteen attributes, such as centralized maintenance facilities, trouble recording, routine test facilities, line load control features, traffic and maintenance monitoring system, mean time between failures, mean time to repair, printed circuit-board replacement time, etc.

Group (5)—Power: Five attributes related to power, such as voltage stability, uninterruptible power system (UPS) capability, type of batteries, dc power drain, etc.

Group (6)—Traffic: Nine attributes related to traffic, such as blocking probability, traffic per line, traffic per trunk, etc.

For each group from (2) to (6), a decision matrix was formed. See Tables IV-VIII.

Table IX shows the group decision matrix and the emphasis coefficient obtained for each group.

Four bidders submitted proposals that met all basic requirements. Table X shows the cost bid by each, ranging from U.S. \$2.24 million to U.S. \$3.21 million. A proposal decision matrix was then formed for each of the 70 attributes. Table XI shows the proposal decision matrix for the only attribute of Group (1), the cost. The decisions in this case were simple to make because they reflected the unweighted original costs taken from Table X.

In Tables XII and XIII, the proposal decision matrices for attributes 1 and 9 of Group (2) are shown for illustration purposes. They also show the special case of two proposals which met equally well the performance criteria for specific attributes. In such cases, the decision was expressed with a value of "indifference" by assigning 1/2 instead of 0 to 1.

Next, the F.O.M. corresponding to each proposal was calculated for each group of attributes. Table XIV shows the emphasis coefficients of the 11 attributes of Group (2), which were obtained from the attribute decision matrix (Table IV). The table was completed with the proposal emphasis coeffi-

# APÉNDICE

TABLE X  
PROPOSAL UNWEIGHTED COSTS

PROPOSAL	UNWEIGHTED COSTS
P <sub>A</sub>	2.33
P <sub>B</sub>	2.60
P <sub>C</sub>	3.21
P <sub>D</sub>	2.94

TABLE XI  
PROPOSAL DECISION MATRIX FOR ATTRIBUTE 1—GROUP (1)

	1	2	3	4	
P <sub>A</sub>	1	0	1	1	0
P <sub>B</sub>	2	0	0	1	0
P <sub>C</sub>	3	0	0	0	0
P <sub>D</sub>	4	1	1	1	0

TABLE XII  
PROPOSAL DECISION MATRIX FOR ATTRIBUTE 1—GROUP (2)

	1	2	3	4	
P <sub>A</sub>	1	0	1/2	1	2
P <sub>B</sub>	2	1/2	0	1	2.5
P <sub>C</sub>	3	0	0	0	3.000
P <sub>D</sub>	4	0	0	0	0

TABLE XIII  
PROPOSAL DECISION MATRIX FOR ATTRIBUTE 1—GROUP (3)

	1	2	3	4	
P <sub>A</sub>	1	0	1/2	1	2.5
P <sub>B</sub>	2	1/2	0	1	2.5
P <sub>C</sub>	3	0	0	0	3.000
P <sub>D</sub>	4	0	0	0	0

TABLE XIV  
PROPOSAL'S FOM FOR GROUP (2)—SWITCHING

	1	2	3	4	
P <sub>A</sub>	1	0	1/2	1	2
P <sub>B</sub>	2	1/2	0	1	2.5
P <sub>C</sub>	3	0	0	0	0.000
P <sub>D</sub>	4	1/2	0	1	2.5

TABLE XV  
PROPOSAL'S FOM FOR GROUP (3)—TRANSMISSION

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	F.O.M.
Proposals	0.113	0.333	0.113	0.113	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.333
A	0.113	0.333	0.113	0.113	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.333
B	0.000	0.300	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
C	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
D	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333

TABLE XVI  
PROPOSAL'S FOM FOR GROUP (4)—MAINTENANCE

	Group (4): Attributes/Ephasis Coefficients													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	F.O.M.
Proposals	0.113	0.154	0.141	0.064	0.103	0.013	0.120	0.026	0.090	0.077	0.031	0.000	0.038	
A	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	
B	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
D	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	

cients obtained from the proposal decision matrices, examples of which are shown in Tables XII and XIII. From Tables XII and XIII, one can see that proposal P<sub>D</sub> received the highest ranking even though it was the second lowest bidder and cost had been assigned a weight of 33 percent. The lowest bidder P<sub>A</sub> ranked second. From Table XIII one can see that, besides cost, the groups considered most important were (2), (6), and (4), in that order. In those three groups of attributes, proposal P<sub>D</sub> had higher emphasis coefficients, while in groups (3) and (5), which were considered less important, proposal P<sub>A</sub> had higher emphasis coefficients.

Finally, the figures of merit obtained for each group were added after being weighted by the emphasis coefficient of the corresponding group from Table IX. This weighted sum provided the final ranking of the proposals. The result of this operation is shown in the last column to the right of Table

XIX. From Tables X and XIX, one can see that proposal P<sub>D</sub> received the highest ranking even though it was the second lowest bidder and cost had been assigned a weight of 33 percent. The lowest bidder P<sub>A</sub> ranked second. From Table XIII one can see that, besides cost, the groups considered most important were (2), (6), and (4), in that order. In those three groups of attributes, proposal P<sub>D</sub> had higher emphasis coefficients, while in groups (3) and (5), which were considered less important, proposal P<sub>A</sub> had higher emphasis coefficients.