

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un Distrito de Frío, a nivel de prefactibilidad, en el Campus
Gustavo Galindo

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Mejía Monroy Miguel Agustín

Moreno Almeida Tamara Estefanía

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado a mis queridísimas abuelas. Cada una de ellas me vio crecer y superarme a mí mismo, lamentablemente ninguna pudo verme llegar hasta aquí, aunque nunca tuvieron dudas al respecto. Desde donde sea que estén, esto es para ustedes con todo mi amor.

Miguel Agustín Mejía Monroy

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mi familia, en especial a mis padres, quienes no solo estuvieron conmigo en cada paso que di para alcanzar esta meta, sino que también me alentaron a superarme en otros ámbitos depositando su entera confianza en mí.

Tamara Estefanía Moreno Almeida

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios porque sin él nada es posible, a mi familia por el amor y apoyo brindado que me ayudó a llegar a la obtención de mi título. Agradecer a los ingenieros Jaqueline Litardo, Rubén Hidalgo, José Macías, Guillermo Soriano Ph. D. y Ángel Ramírez Ph. D. por toda la ayuda brindada desde el primer día en que iniciamos este proyecto, por último, pero no menos importantes, a las amistades que formé a lo largo de mi carrera y que me dieron ánimos para no rendirme y seguir adelante, en especial a mi compañera de proyecto por la entrega y dedicación mostrada durante la consecución de este trabajo.

Miguel Agustín Mejía Monroy

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, agradezco a Dios por ser el pilar fundamental de mi vida y brindarme fortaleza para poder enfrentar cada una de las adversidades de esta trayectoria

A mis padres y hermanos, gracias por su apoyo incondicional e infinita paciencia a lo largo de este camino y que sin sus consejos no hubiese sido lo mismo.

Quiero extender mis agradecimientos a los ingenieros Jaqueline Litardo, Rubén Hidalgo, José Macías, Guillermo Soriano Ph. D. y Ángel Ramírez Ph. D. quienes nos transmitieron sus conocimientos para el desarrollo de este proyecto.

Por último, a mis compañeros y amigos con los que he compartido a lo largo de la carrera para llegar a este logro, sobre todo a mi compañero de este proyecto por su perseverancia y esfuerzo para culminarlo exitosamente.

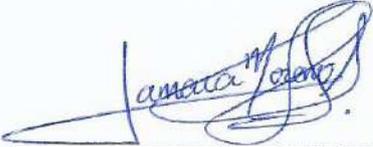
Tamara Estefanía Moreno Almeida

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Mejía Monroy Miguel Agustín, Moreno Almeida Tamara Estefanía* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Mejía Monroy Miguel Agustín



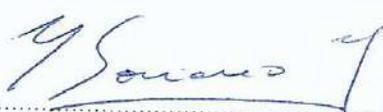
Moreno Almeida Tamara Estefanía

EVALUADORES



RAMÍREZ MOSQUERA ANGEL, Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA



SORIANO IDROVO GUILLERMO, Ph. D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los sistemas de aires acondicionados convencionales HVAC consumen la mayor parte de energía de un edificio, especialmente en climas húmedos, emitiendo grandes cantidades de CO₂ al ambiente, lo óptimo es reemplazarlo por un sistema eficiente que disminuya dicho consumo y consecuentemente los costos generados.

Frente a esta problemática, se propuso la implementación de un distrito de frío, promoviendo las tendencias de campus sostenible, para lo cual se modelaron 4 edificios del campus Gustavo Galindo en SketchUp mientras que, en la plataforma de OpenStudio se analizó el comportamiento energético de cada edificio y se simuló esta solución sustentable para una carga de climatización de 185 TR

Con esta sustitución se logró obtener un ahorro energético de 38% con la misma proporción en la reducción en la huella ecológica y un ahorro económico del 60% equivalente anualmente a 48,600 KWh, 6.8 toneladas de CO₂ y \$5100 respectivamente. Adicional, la implementación del sistema convencional para los 4 edificios tuvo un costo de \$831,000 no obstante, el distrito de frío tuvo un valor de \$144,960

Alrededor de la mitad de la energía de los edificios es consumida por el sistema HVAC actual provocando altos valores a pagar en la planilla eléctrica y generando elevadas emisiones de CO₂. El distrito de frío resulta ser un sistema superior al actual puesto que se obtienen ahorros en diferentes aspectos, y aunque la tarifa eléctrica no compensa el valor de la inversión es la solución más económica a largo plazo.

Palabras Clave: Distrito de frío, HVAC, Campus sostenible

ABSTRACT

Conventional air conditioning systems HVAC consume most of the energy of a building, especially in humid climates, emitting large amounts of CO₂ into the environment, the best solution is to replace it with an efficient system that reduces said consumption and consequently, the costs generated.

Faced with this problem, the implementation of a district cooling, promoting the trends of sustainable campus, was proposed for which 4 buildings of the Gustavo Galindo campus were modeled in SketchUp while, on the OpenStudio platform, the energy behavior of each building was analyzed and this sustainable solution was simulated to an air conditioning load of 185 TR

With this substitution, it was possible to obtain an energy saving of 38% with the same proportion in the reduction in the ecological footprint and an economic saving of 60% equivalent annually to 48,600 KWh, 6.8 tons of CO₂ and \$ 5100 respectively. Additionally, the implementation of the conventional system for the 4 buildings had a cost of \$ 831,000, however, the cold district was worth \$ 144,960

Around half of the energy of the buildings is consumed by the current HVAC system, causing high values to be paid on the electric payroll and generating high CO₂ emissions. The cold district turns out to be a system superior to the current one since savings are obtained in different aspects, and although the electricity tariff does not compensate the value of the investment, it is the most economical solution in the long term.

Keywords: *District Cooling, HVAC, Sustainable Campus*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco Teórico	2
1.4.1. Sistemas VRV.....	2
1.4.2. Distrito de frío	4
1.4.3. Distribución de calor	5
1.4.4. Ventajas y Desventajas	8
1.4.5. Potencial ecológico.....	9
1.4.6. Caso de éxito.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
2. METODOLOGÍA	12
2.1. Levantamiento de información	12

2.2.	Potencial del distrito energético.....	14
2.3.	Categorización de los edificios	15
2.4.	Consideraciones para el modelado y simulación	16
2.5.	Software de simulación	17
2.5.1.	Alternativas del software de simulación.....	17
2.5.2.	Selección del software de simulación	17
2.6.	Línea Base	18
2.6.1.	Modelado de la Línea Base	18
2.7.	Sistema VRV.....	21
2.7.1.	Diseño conceptual sistema VRV.....	21
2.7.2.	Modelado sistema VRV	23
2.8.	Distrito de Frío.....	25
2.8.1.	Diseño conceptual del DC	25
2.8.2.	Modelado del DC.....	28
2.9.	Análisis de costos.....	29
CAPÍTULO 3.....		30
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	30
3.1.	Consumo energético actual.....	30
3.2.	Listado de materiales para el sistema VRV.....	32
3.3.	Consumo energético del sistema VRV.....	33
3.4.	Consumo energético del Distrito Frío	35
3.5.	Comparación entre sistemas de climatización	36
3.6.	Análisis de costos.....	41
CAPÍTULO 4.....		46
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
4.1.	Conclusiones.....	46
4.2.	Recomendaciones.....	49

BIBLIOGRAFÍA.....	51
APÉNDICES.....	54

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioned
RTU	Rooftop Units
VRV	Variable Refrigerant Volume
VRF	Variable Refrigerant Flow
DC	District Cooling
ASHRAE Engineers	American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers
DVSP	Distributed Variable Speed Pump
UE	Unión Europea
HDPE	Polietileno de alta densidad
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
NREL	National Renewable Energy Laboratory
CERA	Centro de Energías Renovables y Alternativas
UBEP	Unidad de Bienestar Estudiantil y Politécnico
CIBE	Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador

SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramo
MJ	Mega Joule
CO ₂	Dioxido de Carbono
m	Metro
km	Kilometro
TR	Tonelada de Refrigeración
BTU	Unidad térmica británica
USD	Dólares estadounidenses
°C	Grados Celsius
K	Kelvin
kPa	Kilopascal
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de equipo de unidad paquete	3
Figura 1.2. Sistema Toshiba VRV/VRF	3
Figura 1.3. Esquema de distrito de frío.....	4
Figura 1.4. Tipos de topología de red	5
Figura 1.5. Tipos de sistemas de distribución de tuberías.....	7
Figura 1.6. Un DC con múltiples centrales y un almacenamiento térmico.....	8
Figura 1.7. Emisión de CO2 por MJ de calor entregado en la UE y el resto del mundo	10
Figura 2.1. Flujo de trabajo del estudio realizado	12
Figura 2.2. Fresh Food Lab	13
Figura 2.3. Decanato FICT	13
Figura 2.4. Coworking i3 Lab	14
Figura 2.5. Laboratorio de Mecánica de Suelos	14
Figura 2.6. Modelo Fresh Food Lab.....	19
Figura 2.7. Modelo decanato	19
Figura 2.8. Modelo i3 Lab	19
Figura 2.9. Modelo Laboratorio.....	20
Figura 2.10. Asignación de cargas a los espacios de los edificios	20
Figura 2.11. Los cassette de flujo redondo pueden alcanzar más área en un cuarto....	21
Figura 2.12. Las unidades cassette no interfieren con la estética del lugar.....	22
Figura 2.13. Plano detallado del sistema VRV para el Laboratorio.....	22
Figura 2.14. Diagrama de tuberías para el Laboratorio	24
Figura 2.15 : Modelado del ramal intermedio del sistema VRV del Laboratorio	25
Figura 2.16. Vista satelital de los edificios	25
Figura 2.17. Diseño conceptual del DC	26
Figura 2.18. Lazo del sistema del DC en el entorno de OpenStudio	28
Figura 3.1 Consumo energético según demanda.....	31
Figura 3.2. Energía utilizada por tipo de equipo e iluminación	32
Figura 3.3 Comparación en el desempeño energético del VRV versus la línea base ...	34
Figura 3.4 Comparación en el desempeño económico del VRV versus la línea base...	35
Figura 3.5 Comparación de consumo energético dependiendo del número de edificios	36

Figura 3.6 Ahorro energético del DC comparado con la línea base	37
Figura 3.7 Comparación del costo de la tarifa eléctrica para cada escenario.....	38
Figura 3.8 Ahorro económico del DC comparado con la línea base.....	38
Figura 3.9 Reducción de las emisiones de CO2 del DC comparado con la línea base .	39
Figura 3.10 Resumen de los beneficios del DC vs la línea base	40
Figura 3.11 Resumen de los beneficios del VRV vs la línea base.....	40
Figura 3.12 Rentabilidad del sistema VRV	44
Figura 3.13 Rentabilidad del sistema DC	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características DC La Alpujarra	11
Tabla 2.1 Capacidad de los sistemas HVAC instalados	15
Tabla 2.2. Clasificación de iluminación y equipos.....	16
Tabla 2.3. Matriz de decisión para la selección del software	18
Tabla 2.4. Parámetros de operación del DC.....	27
Tabla 2.5. Características del diseño del DC.....	27
Tabla 2.6. Tipos de chillers de compresión y sus capacidades	27
Tabla 3.1. Estimación del consumo energético anual.....	30
Tabla 3.2 Lista de materiales sistema VRV para Laboratorio de Mecánica de Suelos..	32
Tabla 3.3 Consumo energético anual respecto a climatización con el sistema VRV.....	33
Tabla 3.4 Resultados del DC para 4 edificios	35
Tabla 3.5 Beneficios anuales del VRV implementado en los 4 edificios	41
Tabla 3.6 Beneficios de un DC implementado en 4 edificios	41
Tabla 3.7 Beneficios de un DC implementado en todo el campus	41
Tabla 3.8 Análisis de costos para el VRV con 4 edificios	42
Tabla 3.9 Análisis de costos para un DC con 4 edificios	42
Tabla 3.10 Análisis de costos para un DC implementado en todo el campus	43

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Sistema VRV Coworking i3lab
- PLANO 2 Sistema VRV Decanato FICT
- PLANO 3 Sistema VRV Fresh Food Lab Planta Baja
- PLANO 4 Sistema VRV Fresh Food Lab Planta Alta

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe gran preocupación debido al cambio climático y el alto consumo energético. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) es solo uno de los diversos sectores responsables. Se estima que en países desarrollados el uso de estos representa la mitad de la energía utilizada en edificios y un quinto de la energía total a nivel nacional (Pérez-Lombard et al., 2008). En Latinoamérica, aproximadamente el 31% de la energía total de estos representa el consumo eléctrico. (Ürge-Vorsatz et al., 2015) Debido a las altas temperaturas del planeta, se proyecta que en los próximos 30 años la demanda de estos sistemas se triplique (PricewaterhouseCoopers, s. f.).

Hoy en día se han desarrollado soluciones más sostenibles como los distritos de frío que han mostrado una disminución en la emisión de CO₂ entre un 30% al 50% (Carreras Bertran, 2013), junto con un mejor aprovechamiento eléctrico. Estos sistemas se han implementado en ciudades como Dubái, Estocolmo, Toronto y Ámsterdam. La ciudad de Medellín es la única a nivel de Latinoamérica que cuenta con esta infraestructura para abastecer a algunos edificios de la Gobernación.

1.1 Descripción del problema

El Campus Gustavo Galindo, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), abarca 40 hectáreas urbanizadas con aproximadamente 60 edificios (*ESPOL - Mapa del campus*, s. f.). La mayoría de ellos cuentan con este tipo de sistema HVAC tradicionales que contribuyen a un considerable gasto energético y contaminación ambiental. Lo ideal sería reemplazarlos por un sistema más eficiente para que la institución disminuya sus gastos en planilla eléctrica y sea más sostenible con el ambiente.

1.2 Justificación del problema

Las técnicas que permitan mejorar la carga por acondicionamiento de aire en edificaciones y barrios es un tema de investigación actual ya que estos sistemas tienen el potencial de contribuir significativamente a un mejor desempeño energético y a disminuir la potencia instalada en equipos de refrigeración. A medida que seguimos

expandingo las zonas urbanas, es vital crear entornos que sean sustentables para la sociedad y disminuyan la contaminación. Un estudio que justifique la implementación de estos sistemas innovadores, tanto en el aspecto ambiental como en el social y económico, promoverá la tendencia respecto a campus sostenibles y proyectaría a la ESPOL como un exponente a nivel latinoamericano. Dada la enorme infraestructura del campus se decidió hacer el estudio con una muestra de los cuatro edificios más importantes ubicados alrededor de la Facultad de Ciencias de la Tierra.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar, a nivel de prefactibilidad, un sistema de distrito de frío que abastezca a un grupo de 4 edificios del Campus Gustavo Galindo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Medir el desempeño energético y las condiciones de operación de los sistemas eléctricos HVAC actuales del grupo de edificios.
- Dimensionar el distrito de frío que sirva a los edificios a través de un estudio de carga térmica y energética.
- Analizar el impacto en el consumo eléctrico para tres escenarios: sistemas HVAC instalados, sistema optimizados y de un distrito frío en el campus.
- Comparar desempeño energético entre los sistemas de distritos de fríos y sistemas aislados de edificios

1.4 Marco Teórico

1.4.1. Sistemas VRV

Actualmente el campus utiliza equipos de aire acondicionado tipo Paquete (expansión directa) o RTU por sus siglas en inglés, como se aprecia en la Fig. 1. Estos han sido usados durante varios años y su tecnología ha quedado obsoleta en comparación con las nuevas opciones del mercado. Los sistemas de Volumen de Refrigerante Variable (VRV) fueron desarrollados por la empresa Daikin Industries en la década de los 80. Consisten en equipos que solo utilizan refrigerante como material de enfriamiento, los compresores usan tecnología de frecuencia variable (VFD), lo que implica que bajan el consumo energético para las cargas de climatización debido a que regula su potencia dependiendo de la demanda y utilizan muchas unidades manejadoras de aire como se puede observar en la Fig. 2. Otra denominación utilizada es Flujo de Refrigerante

Variable (VRF) y es el que utilizan el resto de las compañías por motivos de patente. (VRV or VRF ?, s. f.).

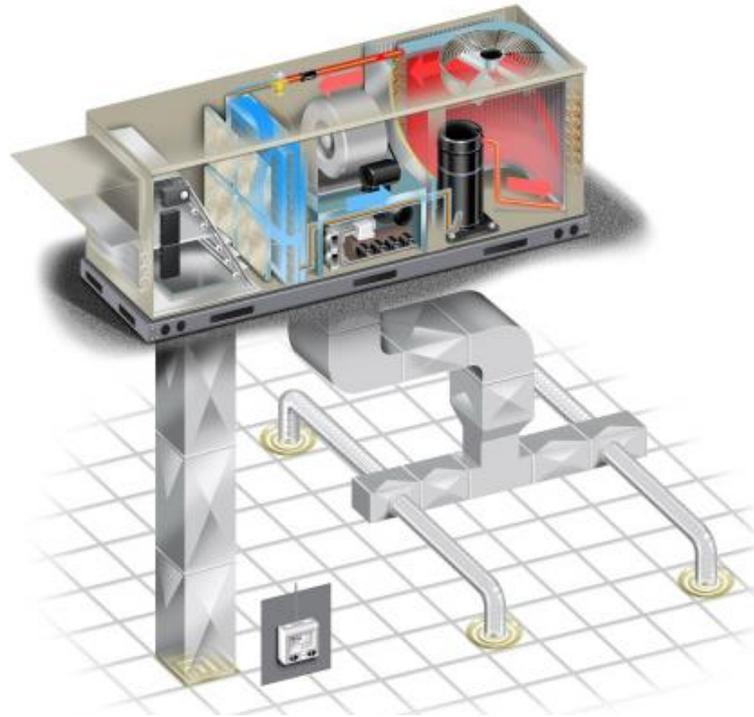


Figura 1.1 Esquema de equipo de unidad paquete

Fuente [Ravti, 2016]

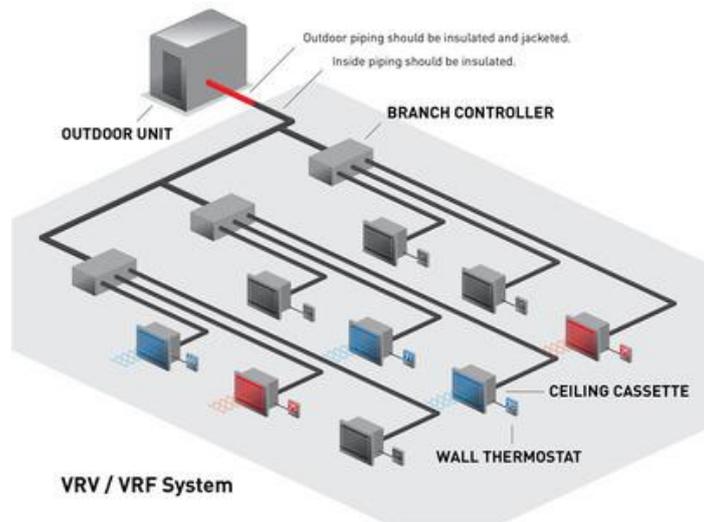


Figura 1.2. Sistema Toshiba VRV/VRF

Fuente [Toshiba Vrf Vrv Systems, s. f.]

1.4.2. Distrito de frío

Los distritos de frío (DC por sus siglas en inglés), son sistemas que se encargan de llevar agua, desde una central hacia un conjunto de edificios mediante una red subterránea de tuberías. La temperatura del agua en los DC está por debajo de los 16°C generalmente. Los DC se han implementado en su mayoría para zonas densamente pobladas, como escuelas, hospitales, oficinas y aeropuertos, no obstante, globalmente, la cantidad de estos sistemas instalados hasta la fecha no se iguala a los distritos de calor.

A partir de los años 90 estos empezaron a utilizar varias tecnologías para refrigeración como enfriadores de agua, comúnmente llamados *chillers*, así como el aprovechamiento de lagos fríos y los excesos de energía generados por procesos industriales. La Fig. 3 muestra un esquema de un DC que utiliza un lago para enfriar el agua de abastecimiento y que sirve a su vez como sumidero para el agua caliente. Se deben realizar estudios previos para verificar que esta última acción no afecte de manera nociva a la flora y fauna del cuerpo de agua.

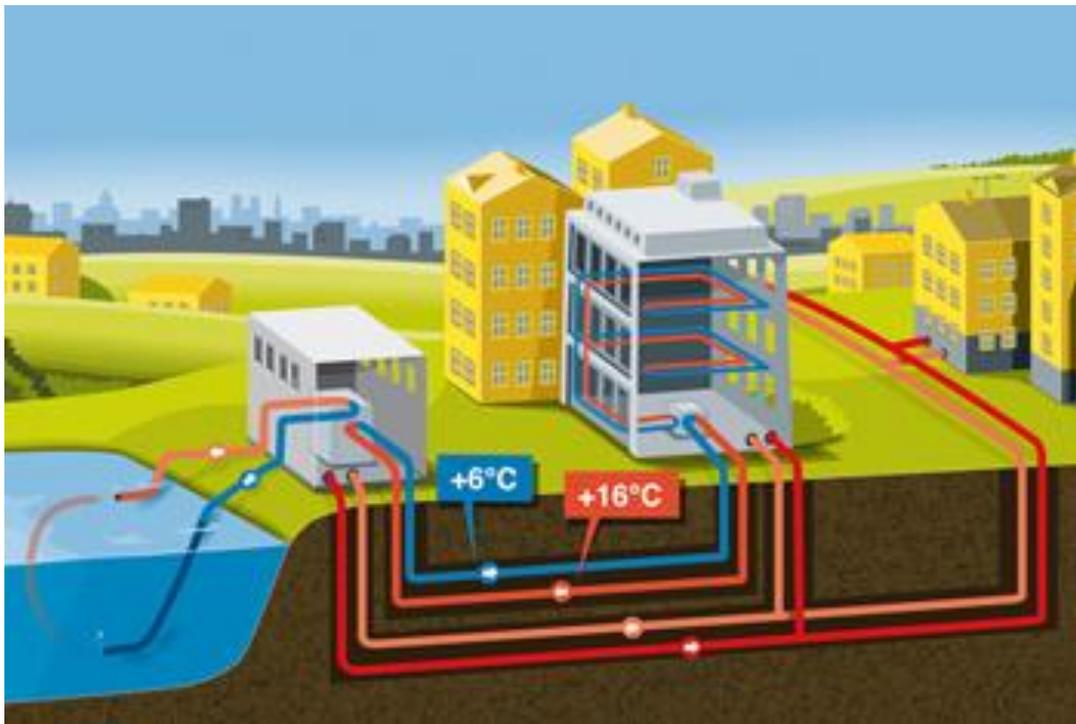


Figura 1.3. Esquema de distrito de frío

Fuente [«Fortum to build sustainable district cooling in Tartu, Estonia | Fortum», s. f.]

1.4.3. Distribución de calor

1.4.3.1. Topología de red

La topología de red hace referencia a la manera en la que se distribuyen las tuberías para abastecer a todo el distrito. Existen tres tipos principales de topologías en las que nos hemos basado en este estudio: radial, anillo y mallado. Las de tipo radial se utilizan en un sistema centralizado, que puede ser una caldera si se trata de un distrito de calor o un chiller si se trata de un distrito frío. Esta clase es la más barata ya que utiliza menos metraje de tuberías, en ocasiones se le llama de tipo árbol.

Las de anillo consisten en un bucle y permiten más de una fuente de energía, pero el flujo másico que requiere para llegar a todos los edificios es mayor, por lo que el diámetro de la tubería debe incrementar en comparación con las de tipo radial. Las de tipo mallado son las más utilizadas en distritos de alta demanda energética y diversidad de cargas ya que este es el sistema óptimo para flujos bidireccionales. Son la clase más segura en el abastecimiento con la desventaja de que es a su vez el más caro por la cantidad de tuberías. No obstante, esta red es apta para ser expandida si más edificios son considerados para el distrito, algo que es más difícil para las otras. (Long, 2018) En la Fig. 4 se puede observar un esquema de lo mencionado previamente.

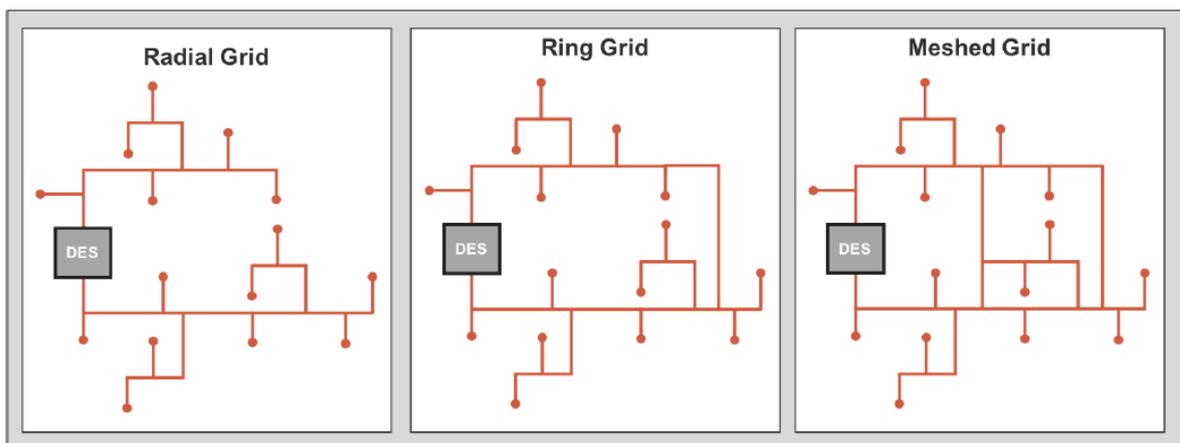


Figura 1.4. Tipos de topología de red

Fuente [von Rhein, 2018]

1.4.3.2. Configuración de tuberías

La configuración de tuberías que se escoja tendrá un gran impacto en el costo de la inversión de todo el distrito energético. Dependiendo la manera en que se conecten las tuberías, su diámetro cambiará de acuerdo con la caída de presión y flujo másico. Los sistemas por donde circula agua usualmente son clasificados según del número de tuberías que conforman la red de distribución de calor/frío.

1.4.3.2.1. Sistema de una tubería

Este tipo de configuración utiliza la misma tubería para el abastecimiento y el retorno del flujo. La ventaja principal es el costo de la inversión, el cual se reduce al menos a la mitad de lo que se gastaría con un sistema de dos tuberías y con menos accesorios, sin embargo, esta configuración genera pérdidas en la exergía debido a la mezcla entre temperaturas en la tubería principal, lo que dificulta que el sistema envíe a la misma temperatura de descarga hacia las bombas. Otra ventaja son las bajas caídas de presión y tasa de flujo, a diferencia de los sistemas con dos o más tuberías en donde se requieren ser balanceadas mecánicamente y asegurarse que en cada tubería corra la suficiente cantidad de flujo másico para poder compensar las demandas térmicas. (*ASHRAE Handbook—HVAC System and Equipment*, 2008)

1.4.3.2.2. Sistema de dos tuberías

Los sistemas con dos tuberías típicamente se conectan en paralelo, esto se debe a que idealmente provee a cada bomba, también llamada subestación, el flujo a la misma temperatura de ingreso. Se caracteriza por tener una tubería para el abastecimiento y otra para el retorno del flujo. Se puede subdividir en dos categorías: configuración de retorno invertido y configuración de retorno directo. (Boldt & Keen, 2015)

La primera ofrece mayores facilidades para poder balancear el sistema debido a que la caída de presión en cada circuito paralelo es más o menos el mismo. Para lograr esto se debe instalar una tubería de retorno suplementaria, lo que incrementa el costo de inversión.

La segunda configuración no requiere de una tubería suplementaria. En este arreglo el flujo que sale de la primera bomba de calor es también el primero en regresar a la bomba principal. La Fig. 5 muestra un esquema de los tipos de sistemas de tuberías (Gagné-Boisvert & Bernier, 2018). Cada circuito tiene una caída de presión distinta y para poder

balancear generalmente se requieren más válvulas. Esto ocurre porque la longitud de tubería de abastecimiento no es la misma que la de retorno mientras que en la configuración de retorno invertido ambas tienen aproximadamente la misma longitud. (ASHRAE Handbook—HVAC System and Equipment, 2008)

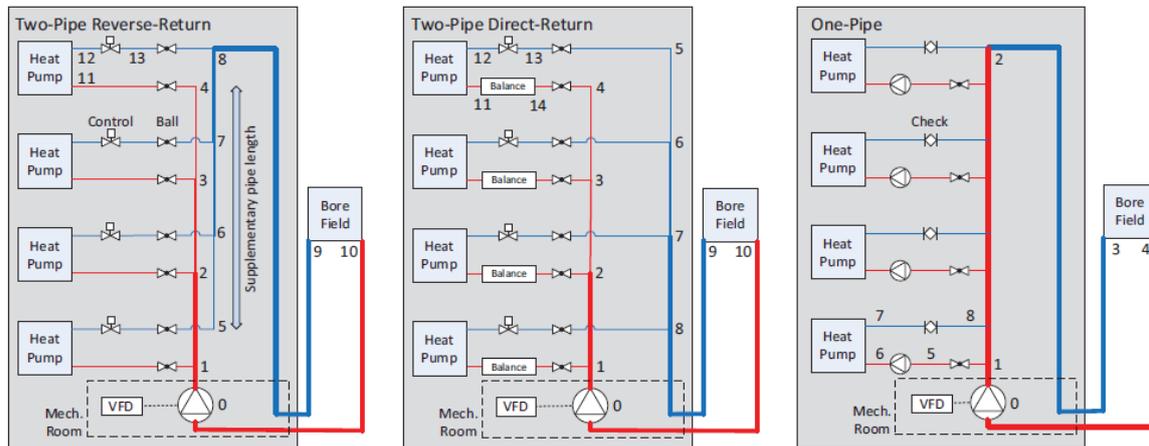


Figura 1.5. Tipos de sistemas de distribución de tuberías

Fuente [Gagné-Boisvert & Bernier, 2018]

1.4.3.3. Almacenamientos de energía térmica

Los almacenamientos térmicos consisten en tanques que recolectan energía para calefacción o refrigeración para ser utilizado luego por algún equipo o sistema. Estos pueden ser tanto artificiales como naturales ya que se pueden aprovechar cuerpos de agua como lagos o mares. De acuerdo con (Berbari, 2016), en los DC se recomienda utilizarlos a partir de una demanda de 12.5 toneladas de refrigeración (TR) ya que logran ahorrar hasta un 12% de la energía utilizada para enfriar el agua de abastecimiento.

Estos equipos permiten cubrir la demanda en horas pico, lo que le da al sistema mayor flexibilidad y mejora su desempeño. La Fig. 6 muestra un ejemplo de DC con 3 plantas centrales y un almacenamiento térmico. En esta red se pueden utilizar bombas de circulación de velocidad variable (DVSP) ya que puede representar un ahorro en el consumo eléctrico (Wang et al., 2017) relacionado al sistema de bombeo entre 30-50%

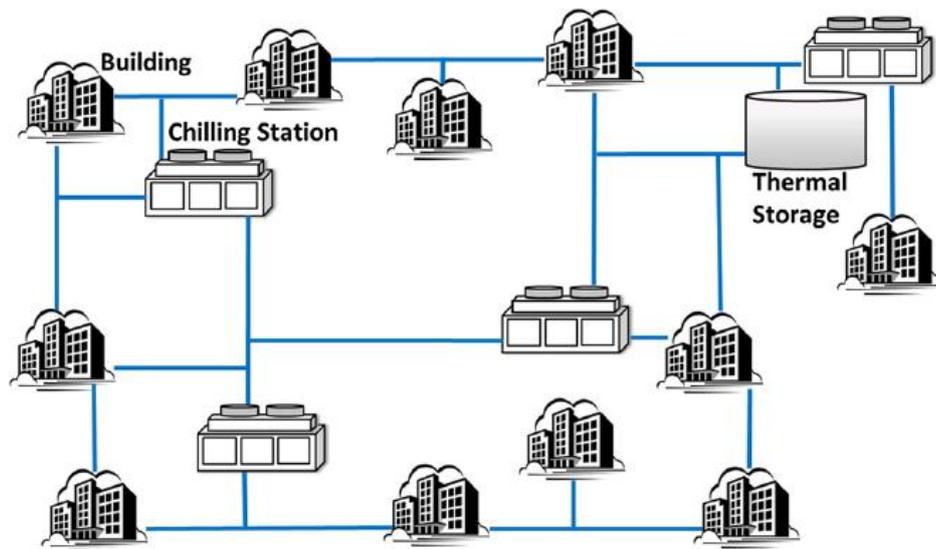


Figura 1.6. Un DC con múltiples centrales y un almacenamiento térmico

Fuente [Wang et al., 2017]

1.4.4. Ventajas y Desventajas

Los distritos energéticos tienen más ventajas que desventajas. En el aspecto ambiental, estos sistemas logran disminuir las emisiones de CO₂ entre 30 -50%, y ocupan menos espacios que los sistemas convencionales en donde se instalan los *chillers* en el techo de los edificios, espacio que podría ser aprovechado para otras actividades o estructuras.

Según (Carreras Bertran, 2013), son de 5-10 veces más eficientes que los sistemas HVAC por lo que tienen un menor consumo energético y menores costos en mantenimiento. El ruido que generan es mucho menor al de los sistemas convencionales, por lo que son más agradables para el cliente. Son sistemas más seguros para cubrir grandes demandas térmicas.

La mayor desventaja que presentan está en el aspecto económico. El costo de inversión es muy alto en comparación con los de aire centralizado que se usan convencionalmente por lo que se debe realizar un estudio previo que justifique la implementación de este. Por este motivo, solo son aplicables en zonas densamente pobladas donde el consumo energético respecto a climatización es enorme, de aproximadamente 10,000 TR/km² (Olama, 2017). Adicional a esto, los equipos descentralizados, como los aires acondicionados, son incompatibles con los distritos energéticos por lo que no pueden ser aprovechados en el nuevo diseño y los sistemas que aprovechan los recursos naturales

como los océanos para almacenamientos térmicos deben hacer una inversión adicional para proteger a los equipos y ductos del ambiente salino y la corrosión que producen.

Otra desventaja es que utilizan grandes cantidades de agua, aproximadamente entre 50% hasta 80% más que cualquier otra tecnología de refrigeración (*District Cooling*, s. f.). Muchos sistemas intentar reducir este impacto al reutilizar el agua de fuentes desalinizadas o naturales. En el caso de que se use el agua de mar, se deben hacer estudios previos que garanticen que las temperaturas en las que se regrese el agua no afecten a la flora y fauna marina.

1.4.5. Potencial ecológico

Los distritos energéticos se proyectan a ser una solución más viable para el planeta debido a su baja emisión de CO₂ y consumo energético. La Fig. 7 muestra una estimación de la emisión de CO₂ en gramos por cada Mega Joule (MJ) de calor entregado desde 1990 por todos los distritos de calor en la Unión Europea (UE) versus los del resto del mundo. La emisión de la UE ha disminuido aproximadamente 40% en comparación con el resto del mundo, en donde se ha mantenido una tendencia casi constante.

En ciudades como Geneva, Estocolmo o Ámsterdam se aprovechan los cuerpos de agua como almacenamientos de agua fría y utilizarlos durante el verano. Como no se gasta en infraestructura, el único costo involucrado es la distribución de bombas. En Barcelona, Viena y varias ciudades de Suecia se operan *chillers* de absorción para reutilizar el exceso de calor de los procesos industriales para fines de calefacción como enfriamiento.

Los distritos energéticos no resultaban competitivos debido al bajo precio de los combustibles fósiles, por esta razón algunos países tratan de cambiar la matriz de producción de calor mediante leyes. Dinamarca y Suecia han implementado incentivos legislativos hacia el aprovechamiento de calor para el sector industrial al mismo tiempo que incrementaron los impuestos de los combustibles fósiles. (Werner, 2017)

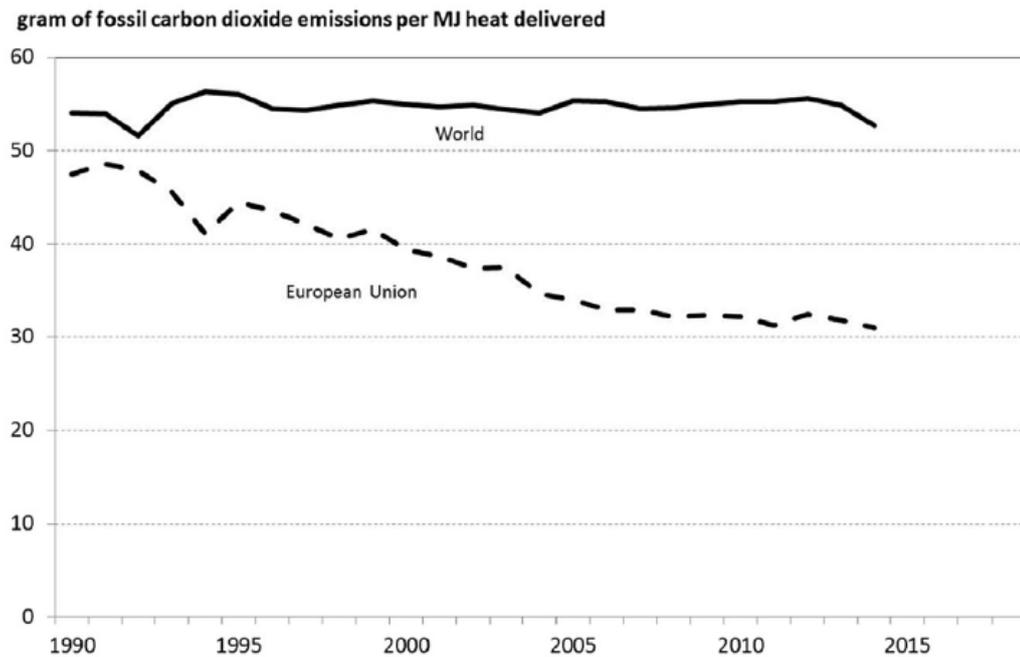


Figura 1.7. Emisión de CO₂ por MJ de calor entregado en la UE y el resto del mundo

Fuente [Werner, 2017]

1.4.6. Caso de éxito

Desde el año 2016, en la ciudad de Medellín, Colombia, entró en operación el distrito térmico La Alpujarra, un proyecto innovador en Latinoamérica que busca reducir la huella de carbono de la ciudad. La infraestructura se encarga de proporcionar el sistema de climatización a la Gobernación de Antioquia, el edificio del Municipio de Medellín y el edificio de Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales. Se estima que la emisión de CO₂ se redujo en un 30% en lo que respecta al uso de acondicionamiento de aire. La Tabla 1 muestra un resumen de sus características principales.

Tabla 1.1 Características DC La Alpujarra

Capacidad fase inicial	3,600 TR
Capacidad final proyectada	10,000 TR
Red de distribución inicial	1.8 km
Red de distribución final proyectada	3 km
Diámetro tubería principal	20"
Material de las tuberías	HDPE
Empresa responsable	Empresas Públicas de Medellín

Fuente [«Distrito térmico La Alpujarra, pionero en América Latina—Distrito energético», s. f.]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este estudio se analizó la situación energética actual de varios edificios del campus enfocándonos exclusivamente a los sistemas de climatización que tienen. Luego de esto se comparó el desempeño del sistema HVAC actual versus la tecnología VRV. Una vez culminado esto se procedió con el diseño del DC y el análisis de costos. La Figura 8 muestra el flujo de trabajo que se siguió a lo largo del estudio.

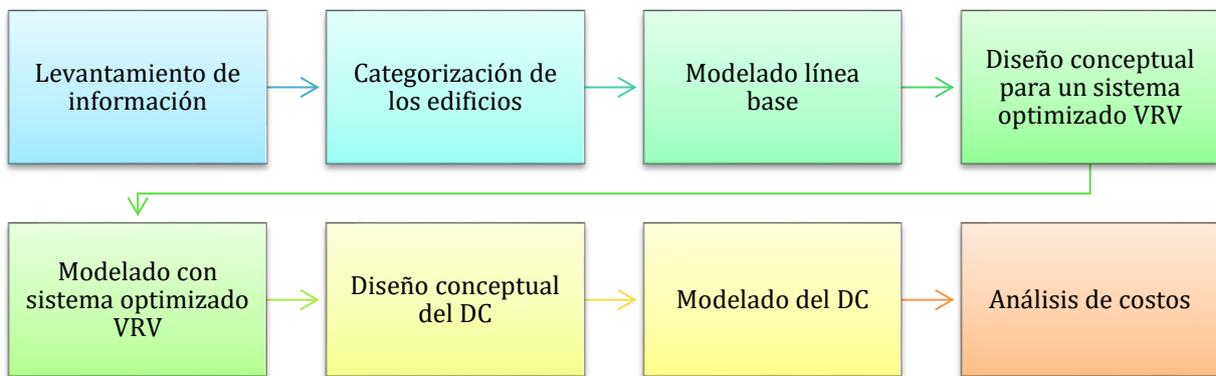


Figura 2.1. Flujo de trabajo del estudio realizado

Fuente [Elaboración propia]

2.1. Levantamiento de información

Esta primera parte del estudio consistió en la recopilación de datos de cada uno de los edificios que formaron parte del DC. Se planteó crear un distrito con una amplia diversidad de cargas entre los consumidores, con esto nos referimos a que no todos los clientes tuvieron el mismo comportamiento energético debido a que cumplen diferentes funciones dentro del campus.

El diseño fue realizado con el restaurante Fresh Food Lab 13M (Fig. 9), el Decanato de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) 13A (Fig. 10), el edificio de Coworking i3 Lab 13L (Fig. 11) y el Laboratorio de Mecánica de Suelos 13E (Fig. 12). La información fue dividida en datos de construcción y de cargas térmicas. En la primera recopilación se tomaron las medidas de las ventanas, puertas y tragaluces para ser incluidos el modelado de los edificios.

Por otro lado, los datos de cargas incluyeron: la distribución de zonas interiores, el tipo y la cantidad de luminaria interior y exterior, el tipo y capacidad del sistema de climatización, la cantidad de personas que normalmente frecuentan el lugar y su horario de permanencia y por último la cantidad, potencia y tiempo de uso de los equipos eléctricos y maquinaria varia.



Figura 2.2. Fresh Food Lab

Fuente [Elaboración propia]



Figura 2.3. Decanato FICT

Fuente [Elaboración propia]



Figura 2.4. Coworking i3 Lab

Fuente [Elaboración propia]



Figura 2.5. Laboratorio de Mecánica de Suelos

Fuente [Elaboración propia]

2.2. Potencial del distrito energético

A partir del levantamiento de información se sumaron las cargas de climatización de las unidades paquete y Split de los edificios a manera de un cálculo inicial para tener una estimación de la capacidad que debe tener el DC para satisfacer las demandas térmicas. La Tabla 2 muestra esta información. El sistema debería tener al menos 12'000,000 Btu/h o 1000 TR para asegurar su rentabilidad, lo cual no se alcanzó con los edificios analizados, sin embargo, se siguió con el estudio debido a los problemas que representaba añadir más clientes ya que esto significaba extender el levantamiento de información e incrementar los tiempos de modelado, lo que haría más pesado al modelo

final y lo volvería imposible de simular debido a su complejidad para el procesador con el que disponemos. Según (Østergård et al., 2018) en la Universidad de Colorado, en conjunto con el *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, simular un DC con tres edificios les tomó cinco minutos y el tiempo de simulación no sigue una relación lineal a medida que aumentan los edificios.

Tabla 2.1. Capacidad de los sistemas HVAC instalados

EDIFICIO	CAPACIDAD (Btu/hr)
Fresh Food Lab	1,374,000
Decanato FICT	438,000
Laboratorio	132,000
i3Lab	276,000

Fuente [Centro de Energías Renovables y Alternativas, 2019]

2.3. Categorización de los edificios

Se incluyó a uno de los edificios más grandes del campus destinado a la preparación, venta y consumo de alimentos, el Fresh Food Lab, el cual cuenta con dos niveles y la demanda es superior en horarios de desayuno y almuerzo en comparación al resto de su tiempo de uso.

Otro de los edificios seleccionados fue el Decanato de la FICT, de carácter administrativo, el mismo que está constituido por oficinas de profesores y secretaría ocupadas durante la jornada laboral y una sala de conferencias en su parte posterior para actividades esporádicas como eventos y charlas además de usarse para clases de maestría. Dentro del análisis también se incluyó el Coworking i3Lab, el cual está destinado para la generación de proyectos de innovación y emprendimiento.

Adicional a esto, la universidad cuenta con una gran cantidad de laboratorios a lo largo del campus y tienen una alta demanda energética debido a sus equipos por lo que se decidió incluir al Laboratorio de Mecánica de Suelos por su cercanía con el resto de los edificios mencionados. Este incluye diferentes tipos de máquinas utilizadas para los diferentes ensayos y pruebas realizados ahí.

Durante el levantamiento de información se encontró con una gran variedad de equipos eléctricos tales como computadoras, impresoras, microondas y demás. Se estableció una clasificación que permita caracterizar cada uno de ellos. Como resultado de esto, la

Tabla 3 muestra la descripción de cada uno junto con la iluminación. Esta metodología fue seguida a partir de las recomendaciones y trabajos realizados en el Centro de Energías Renovables y Alternativas (CERA) de la ESPOL. (Litardo et al., 2019)

Tabla 2.2. Clasificación de iluminación y equipos

Descripción		
Iluminación	Fluorescente (IF)	
	Focos ahorradores (IBC)	LED
Equipos	Equipos de impresión (EI)	Fotocopiadoras, impresoras, plotters
	Electrodomésticos (ELD)	Dispensadores de agua, cafeteras, microondas, refrigeradores, secadoras de mano, televisores.
	Computadoras (COM)	
	Equipos Varios (EV)	Wi-Fi, equipos de audio, equipos de laboratorio, proyectores, cableado.

Fuente [Centro de Energías Renovables y Alternativas, 2019]

2.4. Consideraciones para el modelado y simulación

Hoy en día existe una gran variedad de herramientas tecnológicas que permiten diseñar y simular sistemas de energía urbanos. Este estudio se enfocó en poder analizar las cargas térmicas de los edificios, el comportamiento del usuario, modelado de la planta central y costo del software.

Generalmente, calcular las cargas térmicas resulta en un proceso bastante tedioso en el que se utilizan muchas tablas y factores de seguridad establecidos por asociaciones como la ASHRAE y se suele sobredimensionar un poco las cargas para la selección de un equipo HVAC. Hacer esto para el diseño de un DC resultaría en un aumento exorbitante del costo de inversión por lo que se buscó la manera de ser lo más exactos posible utilizando una herramienta digital.

De la misma manera, la forma en la cual están distribuidos los edificios entre sí es importante para obtener datos como caídas de presión o pérdidas de temperatura mientras el flujo de agua va de un usuario a otro. Dicho esto, se investigó las posibles opciones de softwares que logren caracterizar cada usuario, es decir obtener un análisis de la variación del consumo energético a lo largo del día. Por ejemplo, un restaurante

tiene su mayor demanda energética en horas de almuerzo mientras que para las oficinas es de 8h00 a 16h00.

Debido a que el estudio estuvo basado en un diseño a nivel de prefactibilidad, el diseño detallado de la planta central no fue necesario. Hay que mencionar, además que el diseño de un DC puede resultar bastante complejo por lo que se decidió elegir algún programa en el que se haya realizado un estudio similar y usarlo como referencia.

2.5. Software de simulación

2.5.1. Alternativas del software de simulación

Las opciones que se manejaron fueron ESP-r, EnergyPlus y TRNSYS basado en un estudio realizado por (Allegrini et al., 2015). ESP-r es una herramienta para la simulación de desempeño de edificios que permite modelar calor, aire, luz y potencia eléctrica (*ESP-r*, s. f.). EnergyPlus es un software de simulación usado para obtener el consumo de energía y procesar cargas térmicas en edificios (*EnergyPlus | EnergyPlus*, s. f.), se lo utiliza en conjunto con OpenStudio para el modelado. TRNSYS es un programa que permite representar sistemas de energía eléctrica y térmica en régimen transitorio, de la misma manera, admite modelados de sistemas dinámicos como flujos de tráfico o procesos biológicos, lo que lo convierte en una herramienta digital bastante completa. (*Welcome | TRNSYS: Transient System Simulation Tool*, s. f.)

2.5.2. Selección del software de simulación

La matriz de decisión utilizada para la selección se encuentra en la Tabla 4 en donde se indica que EnergyPlus fue el programa elegido al final. Todas las opciones permiten modelar a nivel de detalle las cargas térmicas y el comportamiento del usuario. Para el caso del modelado de la planta central, solo TRNSYS puede hacerlo de manera más minuciosa mientras que ESP-r y EnergyPlus ofrecen un modelo reducido. No obstante, como se mencionó previamente, un esquema simplificado es lo que se buscó en este estudio por lo que todos obtuvieron la máxima calificación.

Fue de suma importancia encontrar alguna documentación en la que se detalle cómo modelar el DC usando alguno de estos programas o que proporcione ejemplos de una librería virtual. Al final de la investigación no se encontró algún documento acerca de DC usando ESP-r, mientras que en EnergyPlus se encontraron unos pocos, pero con la desventaja de que el software no es capaz de calcular caídas de presión y solo permite

una topología radial. Así mismo, hay pocos trabajos en el que se haya implementado TRNSYS como solución, pero ofrecen un análisis más completo.

Tanto ESP-r como EnergyPlus son gratuitos. En el caso de EnergyPlus, este cuenta con una biblioteca virtual proporcionada por el *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* en donde es posible descargarse componentes y mediciones, lo que le da mayor flexibilidad al sistema. TRNSYS por otro lado es un software pagado, el cual tiene a su disposición varios paquetes que contienen los componentes necesarios para modelar los sistemas antes mencionados, lamentablemente la adquisición de una sola licencia supera los USD 2,000.

Tabla 2.3. Matriz de decisión para la selección del software

Criterios	Ponderación	ESP-r		EnergyPlus		TRNSYS	
Cargas térmicas	0.1	10	1	10	1	10	1
Comportamiento del usuario	0.1	10	1	10	1	10	1
Planta central	0.2	10	2	10	1	10	2
Estudios previos	0.2	0	0	5	2	10	2
Costo	0.4	10	4	10	4	6	2.4
TOTAL	1		8		9		8.4

Fuente [Elaboración propia]

2.6. Línea Base

2.6.1. Modelado de la Línea Base

Una vez obtenida toda la información de cada uno de los edificios, se procedió a modelarlos en Sketchup Make 2017 (Figuras 13-16). Luego de esto se ingresaron las cargas en la plataforma de OpenStudio 2.8.1 en donde el análisis fue realizado con datos meteorológicos del lugar, los cuales simulan las variaciones de temperatura a lo largo de todo el año y no se consideró el periodo vacacional por los que los edificios funcionaron ininterrumpidamente durante 365 días.



Figura 2.6. Modelo Fresh Food Lab

Fuente [Litardo, 2019]

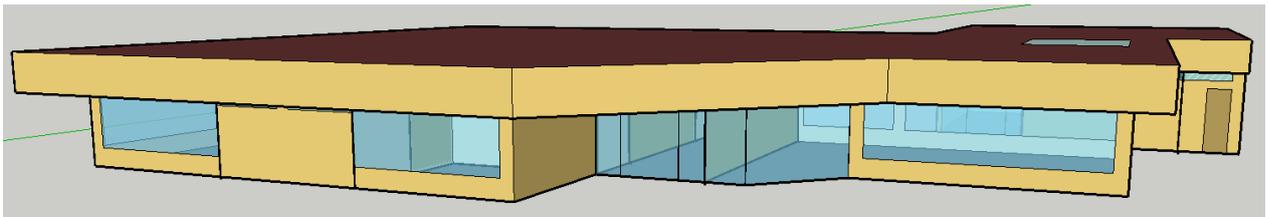


Figura 2.7. Modelo decanato

Fuente [Elaboración propia]

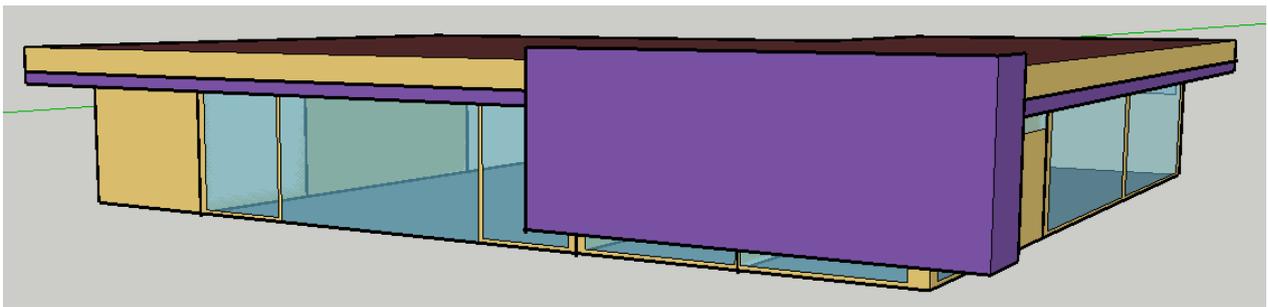


Figura 2.8. Modelo i3 Lab

Fuente [Elaboración propia]

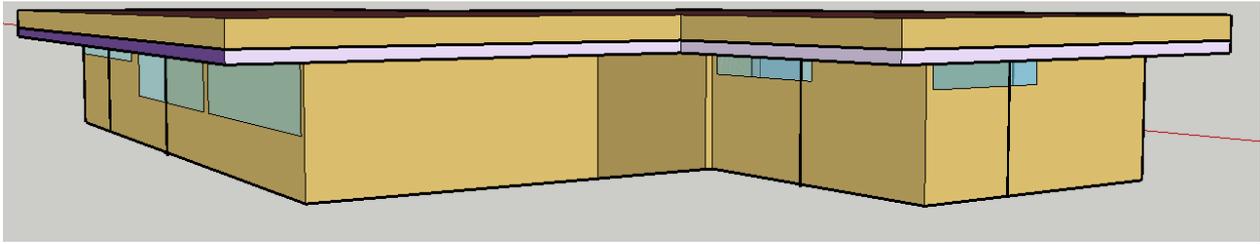


Figura 2.9. Modelo Laboratorio

Fuente [Elaboración propia]

Dentro de la interfaz de OpenStudio se modificaron los edificios al añadir los materiales de construcción de las ventanas, puertas, tumbados, pisos y paredes. Las cargas de luminarias, equipos y tasa de personas ocupando el lugar fueron agregadas a cada uno de los cuartos con sus respectivos horarios tal y como se muestra en la Figura 17.

Space Name	Load Name	Multiplier	Definition	Schedule
Baños Coworking	People 5	3.000000	Personas normal	Horario Baños LIGHT/OCC
	Luminaire 2	14.000000	Fluorescente	Horario Baños LIGHT/OCC
	Electric Equipment 1	1.000000	Baños coworking	Horario Baños coworking EQP
	WholeBuilding - Sm Office - CZ1-3 Infiltration 6	1.000000		Small Office Infil Quarter On
Baños Ofonas	People 4	1.000000	Personas normal	Horario Baños LIGHT/OCC
	Luminaire 3	2.000000	Fluorescente	Horario Baños LIGHT/OCC
	Electric Equipment 2	1.000000	Baños ofonas	Horario Baños EQP
	WholeBuilding - Sm Office - CZ1-3 Infiltration 2	1.000000		Small Office Infil Quarter On
Cafetería	People 2	1.000000	Personas cafeteria	Horario Cafeteria LIGHT/OCC
	Luminaire 5	3.000000	LEDs	Horario Cafeteria LIGHT/OCC
	Electric Equipment 3	1.000000	Cafeteria	Horario Cafeteria EQP
	WholeBuilding - Sm Office - CZ1-3 Infiltration 7	1.000000		Small Office Infil Quarter On

Figura 2.10. Asignación de cargas a los espacios de los edificios

Fuente [Elaboración propia]

Al final se les asignó una zona térmica que contiene el tipo de sistema de climatización HVAC que tienen actualmente, entre los cuales se encuentran equipos Split, unidades paquetes y aires acondicionados de ventana. En la simulación se generó un reporte, el cual incluyó toda la información de cada una de las zonas, entre las más importantes estuvieron la densidad de energía que ocupa el edificio y el precio de la tarifa eléctrica.

2.7. Sistema VRV

2.7.1. Diseño conceptual sistema VRV

Para el diseño del nuevo sistema se necesitó de las cargas térmicas de cada cuarto de los edificios, por lo que se utilizaron los mismos modelos de OpenStudio mencionados previamente. El software tiene la opción de simular los equipos HVAC y calcular la capacidad exacta que deberían tener para llegar al confort térmico. Una vez hecho esto, se seleccionaron las unidades tipo cassette de flujo redondo desde el catálogo de Daikin. Se eligió este equipo por su modelo estético y su capacidad de abarcar más área, las Fig. 18 y 19 muestran cómo funciona.

Se usaron los planos de AutoCad de cada edificio para el diseño conceptual tal y como se ve en la Fig. 20 para el Laboratorio. Todos los planos se encuentran en los Apéndices donde se pueden apreciar con mayor detalle. El número de cassettes requeridos en cada cuarto fue definido dependiendo de la carga y capacidad de este. Una vez colocados, se procedió a unirlos mediante líneas que representaron las tuberías de cobre y las derivaciones. En las oficinas de i3lab y decanato FICT se utilizaron ventilosconvectores o *fan coils* debido a que eran pequeñas zonas compartidas sin divisiones.

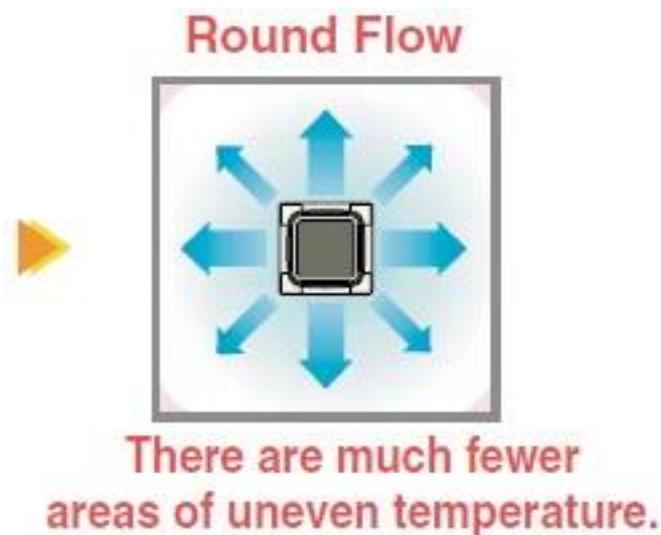


Figura 2.11. Los cassette de flujo redondo pueden alcanzar más área en un cuarto

Fuente [*Sistema VRF cubierta de cassette de flujo unidad Ronda – Your Comfort Air, We Dekon Care!, s. f.*]



Figura 2.12. Las unidades cassette no interfieren con la estética del lugar

Fuente [Sistema VRF cubierta de cassette de flujo unidad Ronda – Your Comfort Air, We Dekon Care!, s. f.]

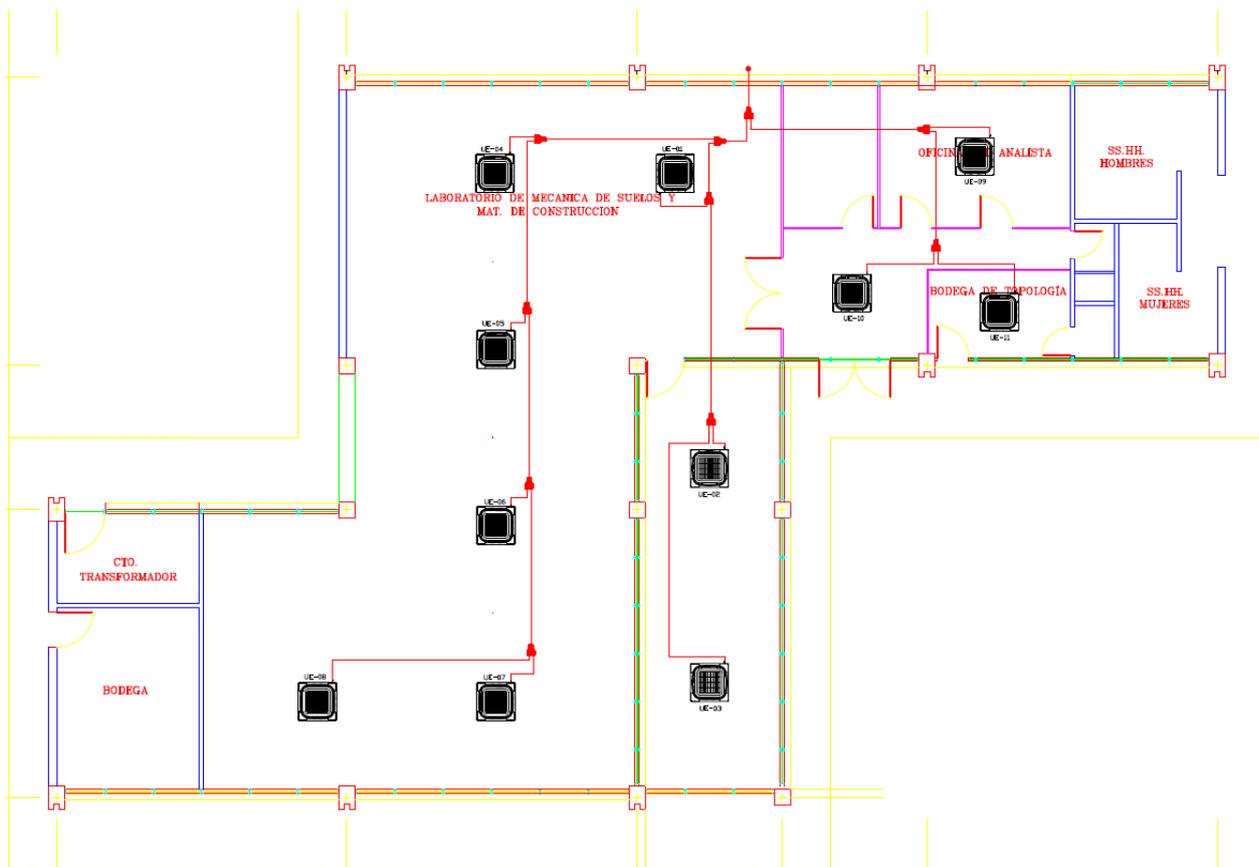


Figura 2.13. Plano detallado del sistema VRV para el Laboratorio

Fuente [Elaboración propia]

2.7.2. Modelado sistema VRV

Para la primera parte del modelado de este sistema se utilizó el software comercial de Daikin, Daikin VRV Xpress 8.6.4, en donde se realizó una selección de manera específica de los cassettes, *fan coils* y equipos condensadores. Adicional a esto, el programa solicitó el número de equipos por edificio, la longitud de las tuberías, la carga térmica y la distribución de las derivaciones, información que podía verse en el plano.

Posterior a esto se utilizó la plataforma de OpenStudio para el modelado de la segunda parte del sistema VRV, para lo cual se partió desde la información del software comercial para seleccionar equipos equivalentes y así simularlo. La Fig. 21 muestra el diagrama de tuberías para el Laboratorio donde se pudo notar que se necesitaron 3 condensadores de 120,000 Btu/h.

Cada uno de los ramales se ingresaron independientemente con sus respectivos componentes de acondicionamiento de aire. En la Fig. 22 se muestra la incorporación del ramal intermedio del sistema VRV del laboratorio, el cual estaba compuesto por un condensador y tres cassettes según la disposición del diseño del sistema. En cada uno de los componentes se colocó las especificaciones técnicas obtenidas anteriormente y la respectiva zona térmica a acondicionar. Finalmente se calculó el consumo energético que demanda este sistema en cada uno de los edificios para ser comparado con el sistema de la línea base y el DC.

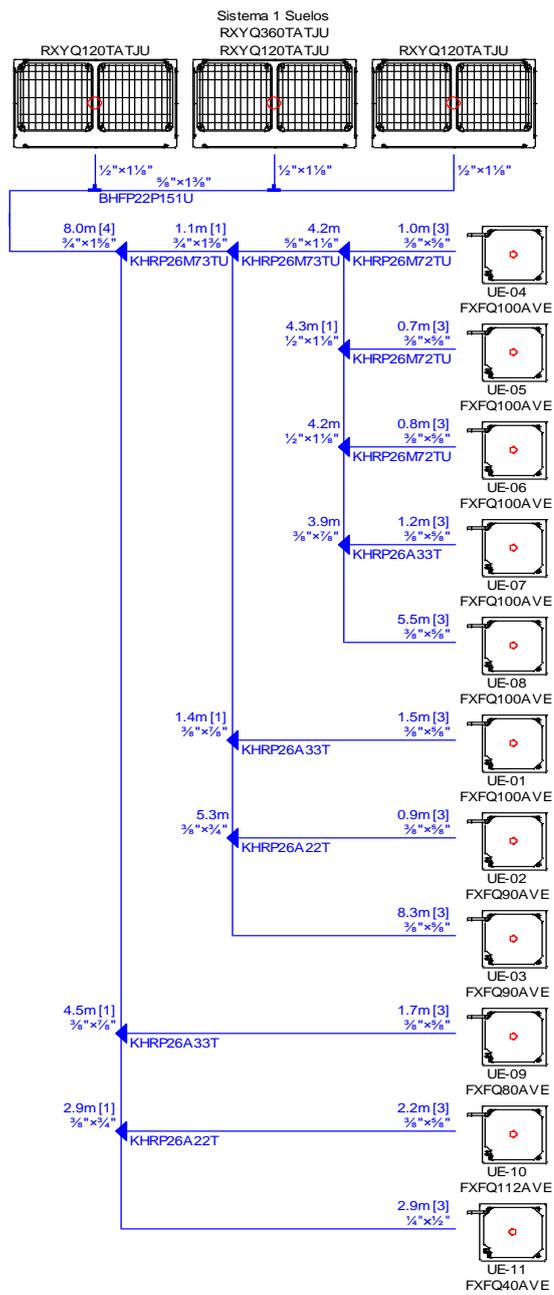


Figura 2.14. Diagrama de tuberías para el Laboratorio

Fuente [SISMECAN, 2019]

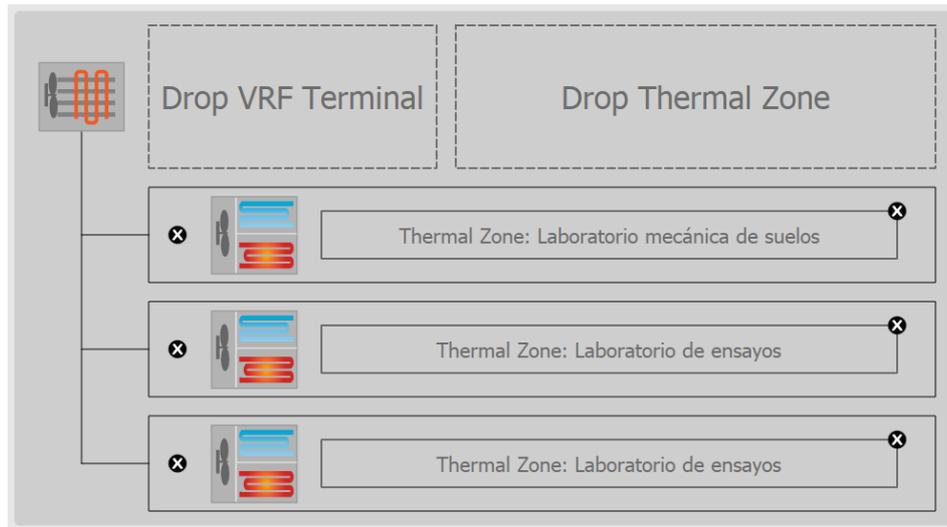


Figura 2.15. Modelado del ramal intermedio del sistema VRV del Laboratorio
Fuente [Elaboración propia]

2.8. Distrito de Frio

2.8.1. Diseño conceptual del DC

El sistema del DC consiste en tres elementos principales: la planta central, las instalaciones del consumidor y las subestaciones. Durante el diseño se tuvo que definir dónde colocar la central y cómo conectar los consumidores entre sí. La Fig. 23 muestra una visión satelital de los edificios analizados y el Lago ESPOL, el objetivo fue colocar el sistema lo más cerca posible de este para estudiar la posibilidad de usarlo como sumidero en futuras investigaciones del CERA.



Figura 2.16. Vista satelital de los edificios
Fuente [Elaboración propia]

Al final se decidió colocarla detrás del Fresh Food debido al espacio disponible y se utilizó una configuración de topología radial ya que es la única que permite EnergyPlus. La Fig. 24 muestra el esquema del DC, en donde la central está representada por el rectángulo celeste, junto con las tuberías de abastecimiento (líneas azules) y las de retorno (rojas). En la configuración de estas se utilizó una tubería principal de la cual salgan las ramificaciones hacia los clientes tal y como lo describe (Otto et al., s. f.). Cabe recalcar que las tuberías son subterráneas y por ende se consideró evadir los edificios para evitar problemas en la instalación.



Figura 2.17. Diseño conceptual del DC

Fuente [Elaboración propia]

Las conexiones desde la central fueron directas con los edificios dado que la carga de climatización total no superó los 15,000 TR y por ende no requirieron de intercambiadores de calor de acuerdo con (Berbari, 2016). Se definieron los parámetros de operación, localizados en la Tabla 5, los cuales fueron utilizados en la simulación. Estos estuvieron basados en el DC de la Alpujarra, en Colombia, según (Velásquez & Alzamora, 2017). Dado que el proyecto consistió en el diseño a nivel de prefactibilidad, no se indagó mucho en el sistema de tuberías dentro de los edificios, válvulas ni sistemas de control. Las consideraciones fueron extraídas del manual de buenas prácticas de DC (International District Energy Association, 2008) y se las puede encontrar en la Tabla 6.

Tabla 2.4. Parámetros de operación del DC

Temperatura de abastecimiento (°C)	7.2
Diferencial de temperatura (K)	6.7
Capacidad (TR)	185
Presión de bombeo (kPa)	180
Longitud de red (km)	1.3

Fuente [Elaboración propia]

Tabla 2.5. Características del diseño del DC

Material de Tubería	HDPE
Tipo de bombas	Bombas de velocidad variable (DVSP)
Configuración de tuberías	Dos tuberías con retorno directo
Almacenamiento térmico	No (al menos no para la fase inicial)
Configuración de chillers	Serie-contraflujo

Fuente [Elaboración propia]

Para la selección del chiller se consideraron dos tipos principales: compresión y absorción. Al final la segunda opción fue descartada debido a sus elevados costos de instalación por cada tonelada de refrigeración (International District Energy Association, 2008). La Tabla 7 muestra un resumen de los diferentes tipos de chillers de compresión. Al final se eligió uno de tipo tornillo debido a que se espera expandir la capacidad del DC en futuros trabajos del CERA.

Tabla 2.6. Tipos de chillers de compresión y sus capacidades

Tipo de Chiller	Rango [TR]
Reciprocante	50 – 230
Tornillo	70 – 400
Centrífugo (pequeño)	200– 1500
Centrífugo (grande con un solo compresor)	1500 – 3000
Centrífugo (grande con doble compresor)	2000 – 6000

Fuente [International District Energy Association, 2008]

2.8.2. Modelado del DC

Entre las variables consideradas para el análisis del DC estaban los datos del consumo y costo de la energía que demanda mas no la disposición del sistema, siendo suficiente el uso de la plataforma de OpenStudio para la obtención de dicha información para su posterior comparación con los otros sistemas de climatización

A partir de los datos meteorológicos ingresados, el sistema HVAC actual generó una tabla con la capacidad de potencia total requerida por el sistema de climatización cada hora del día durante todo el año. Con estos se generaron perfiles de carga de cada edificio, los cuales fueron agregados en la parte de demanda del lazo del DC como se puede apreciar en la Fig. 25, donde el ícono inferior representa la demanda energética de un cliente mientras que en la parte de abastecimiento se encuentra el distrito.

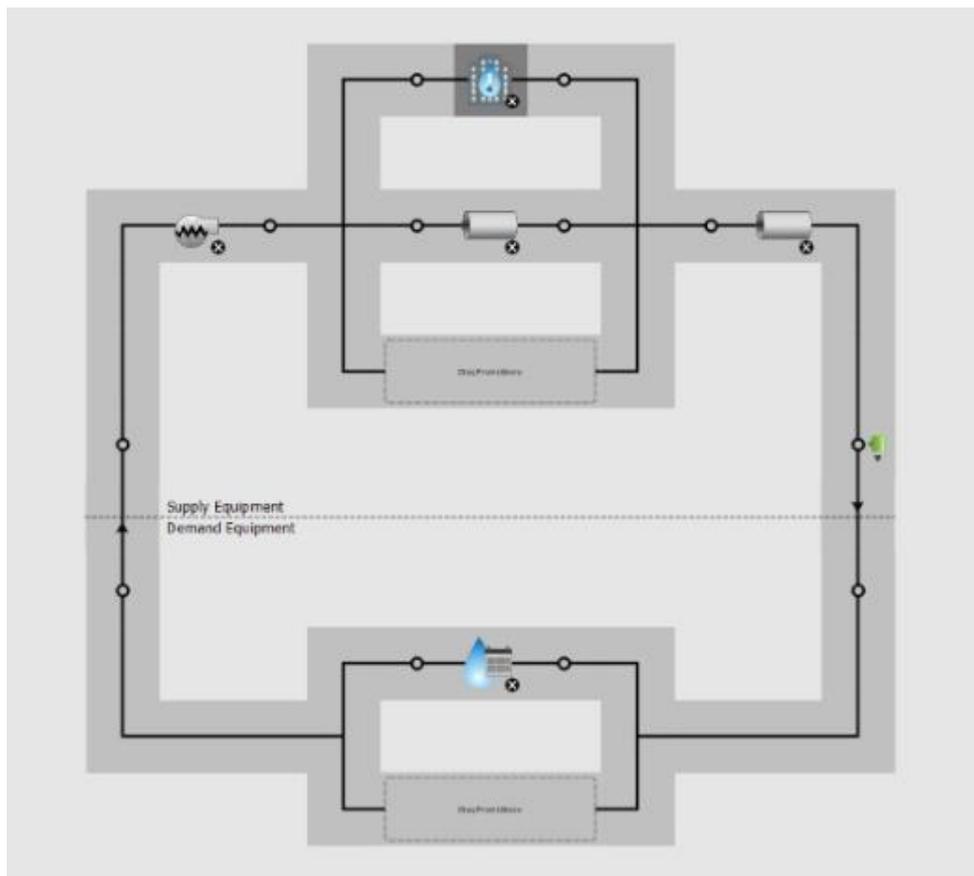


Figura 2.18. Lazo del sistema del DC en el entorno de OpenStudio

Fuente [Elaboración propia]

Una vez realizada la simulación del DC, se añadieron más edificios, lo que ayudó a mostrar una tendencia del consumo y gasto eléctrico a medida que se aumentaban las toneladas de refrigeración. Para esto se escogió un perfil existente de acuerdo con la capacidad de refrigeración más próxima a algún otro edificio en la universidad. Los edificios seleccionados fueron la Unidad de Bienestar Estudiantil Politécnica (UBEP), que demanda 41 TR, con el perfil de Decanato FICT, mientras que, el perfil del Fresh Food fue usado para simular los edificios del Centro de Investigaciones Biotecnológicas (CIBE), Centro de Educación Continua y Prepolitécnico con 123 TR, 90.5 TR y 306 TR respectivamente.

Al final, se graficaron los resultados para obtener las ecuaciones de las rectas para luego realizar una proyección de los beneficios energéticos, económicos y reducción en la huella de carbono de un DC implementado en todo el campus, para esto se usó una estimación de la carga de climatización total de la ESPOL facilitada por el CERA. En el beneficio ambiental se consideró la cantidad de CO₂ que el sistema evita enviar a la atmósfera usando un factor de 0.13 kg CO₂/kWh.

2.9. Análisis de costos

Para este análisis no se consideraron los sistemas de control, equipo eléctricos ni costos de importación para los elementos del DC. Se categorizaron tres tipos de costos: inversión, diseño y mantenimiento. En el primero constó el precio de adquisición de los equipos para los sistemas VRV y DC. A esto hubo que agregarle un costo de diseño igual al 10% del precio total del proyecto. Los equipos de bombeo tienen una vida útil aproximada de 30 años por lo que el análisis del DC fue durante ese lapso, mientras que para los VRV es de aproximadamente 12 años.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados mostrados a continuación siguieron el formato presentado en el trabajo de (Litardo et al., 2019). Cabe recalcar que los datos expuestos a continuación son valores estimados de acuerdo con la información recopilada y no se deben interpretar como cálculos finales para el DC.

3.1. Consumo energético actual

La Tabla 8 revela los resultados de cada edificio en cuestiones energéticas para lo cual se tomó en cuenta el consumo anual (kWh), la demanda pico promedio de manera mensual considerando únicamente la climatización del edificio (kW), la intensidad de unidad de energía (EUI), la cual representa la energía utilizada por metro cuadrado (kWh/m²) y el costo de la tarifa eléctrica (USD).

Tabla 3.1. Estimación del consumo energético anual

		Decanato FICT	Laboratorio Mecánica de Suelos	I3Lab	Fresh Food Lab
Perfil		Oficina	Laboratorio	Oficina	Restaurante
Área [m²]		561	325	358	2,045
Consumo energético anual [kWh]	Total	64,428	52,314	60,178	76,022
	Climatización	27,407	20,912	45,112	33,944
Porcentaje de energía en climatización		44%	40%	75%	45%
Demanda pico promedio mensual [kW]		21.64	11.55	20.94	23.15
Intensidad de unidad de energía [kWh/m²]		111.28	161.18	168.25	37.18

Tarifa eléctrica [USD]	Total	4,447.17	3,541.48	4,242.37	5,427.83
	Climatización	1,956.75	1,416.59	3,181.78	2,442.52

Fuente [Elaboración propia]

En la Gráfica 1 se observa la clasificación de la energía demanda por el decanato FICT en donde el 44% es utilizada para los sistemas de aire acondicionado, superando la de los equipos eléctricos e iluminación. Esta tendencia fue la misma para el resto de los edificios tal como se pueden observar en los gráficos anexados al final del documento.

DECANATO FICT

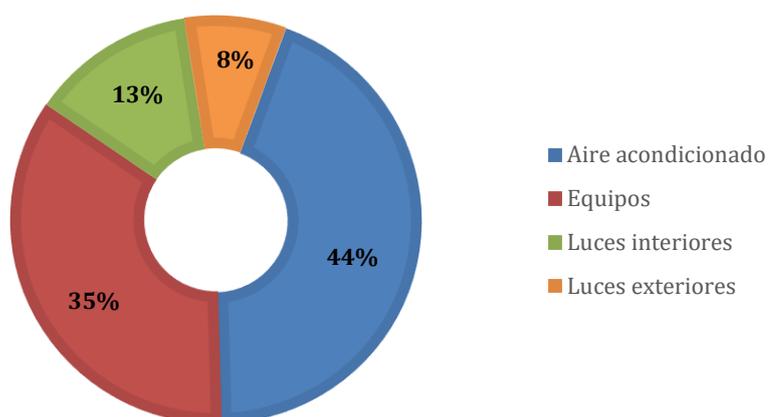


Figura 3.1. Consumo energético según demanda

Fuente [Elaboración propia]

Por otro lado, el Gráfico 2 muestra la distribución de la energía utilizada por los equipos eléctricos e iluminación siguiendo la nomenclatura descrita en la sección anterior excluyendo a los aires acondicionados. Se pudo notar que los electrodomésticos son los que más potencia consumieron seguido por los equipos de impresión como copiadoras e impresoras. Este comportamiento fue el mismo para los demás edificios a excepción del laboratorio de mecánica de suelos, en donde los equipos varios fueron los que más consumieron puesto que las máquinas de ensayos usadas en las prácticas tienen una alta demanda energética al momento de operarlas. El resto de las gráficas se encuentran en los apéndices.

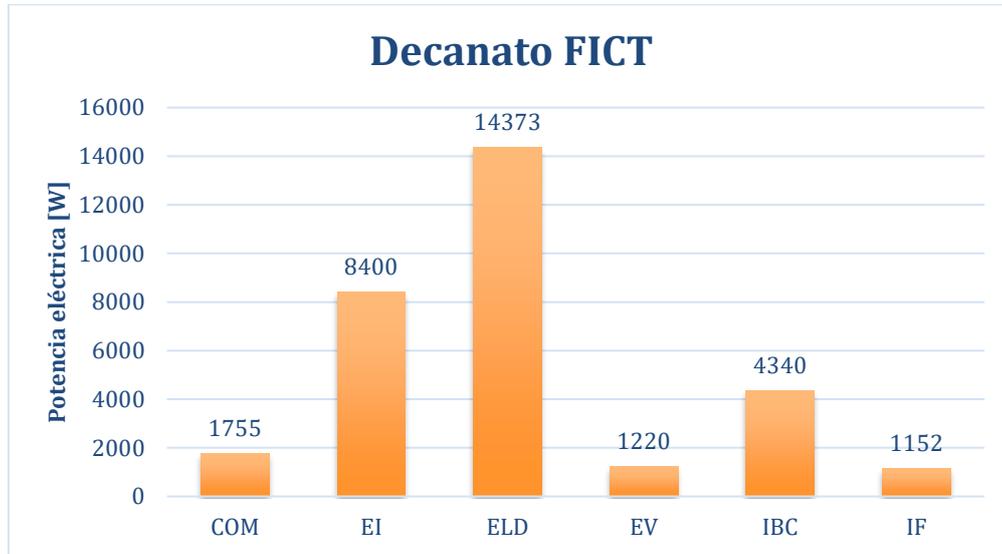


Figura 3.2. Energía utilizada por tipo de equipo e iluminación

Fuente [Elaboración propia]

3.2. Listado de materiales para el sistema VRV

Como se mencionó anteriormente, se utilizó el software Daikin Xpress 8.6.4 proporcionado por la empresa SISMECAN S.A. en donde se obtuvo la selección de los equipos y tuberías para cada una de las zonas, esto se muestra en detalle en la Tabla 9 referente al Laboratorio. En los apéndices se pueden encontrar los listados correspondientes a los demás edificios, así como los planos detallados de la distribución del sistema VRV de cada uno.

Tabla 3.2. Lista de materiales sistema VRV para Laboratorio de Mecánica de Suelos

Modelo	Cantidad	Descripción
RXYQ120TATJU	3	Bomba de calor VRV IV 220V(TATJU)
FXFQ100AVE	6	VRV FA – Cassette de techo (Flujo redondo)
FXFQ112AVE	1	VRV FA – Cassette de techo (Flujo redondo)
FXFQ40AVE	1	VRV FA – Cassette de techo (Flujo redondo)
FXFQ80AVE	1	VRV FA – Cassette de techo (Flujo redondo)
FXFQ90AVE	2	VRV FA – Cassette de techo (Flujo redondo)
KHRP26A22T	2	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26A33T	3	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M72TU	3	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M73TU	2	Kit de tuberías de rama Refnet

Modelo	Cantidad	Descripción
BRC1E62	11	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BYCP125K-W1	11	Panel de decoración
BHFP22P151U	1	Kit de tuberías de conexión múltiple de la unidad exterior
R410A	11.2kg	Cargo extra refrigerante
Tubería ¼"	2.9m	
Tubería ⅜"	41.8m	
Tubería ½"	11.4m	
Tubería ⅝"	28.0m	
Tubería ¾"	17.3m	
Tubería ⅞"	9.8m	
Tubería 1⅞"	12.7m	
Tubería 1⅜"	1.1m	
Tubería 1⅝"	8.0m	
Costo Total		

Fuente [SISMECAN, 2020]

3.3. Consumo energético del sistema VRV

Una vez analizados los sistemas de la línea base que tienen los edificios del campus se repitió este proceso con el nuevo sistema VRV, con los cuales se obtuvieron los resultados de la Tabla 10, en donde se muestra el consumo respecto a climatización ya que el de los equipos eléctricos y luces se mantuvieron iguales.

Tabla 3.3. Consumo energético anual respecto a climatización con el sistema VRV

	Decanato FICT	Laboratorio Mecánica de Suelos	i3lab	Fresh Food Lab
Consumo anual [kWh]	18,862	29,947	31,116	27,101
Porcentaje de energía en climatización	37%	49%	68%	39%
Demanda pico promedio mensual [kW]	17.73	20.35	18.88	14.59

Intensidad de unidad de energía [kWh/m²]	97.99	189.48	132.24	34.15
Tarifa eléctrica [USD]	1,345.70	2,062.47	2,261.41	1,913.34

Fuente [Elaboración propia]

El Gráfico 3 y 4 muestran las comparaciones del desempeño energético y económico del sistema VRV frente al instalado actualmente. Se pudo notar que el Laboratorio fue el único caso en donde el nuevo equipo no obtuvo ningún beneficio sino todo lo contrario, mientras que, en el i3Lab y Decanato, tener este nuevo sistema representa un ahorro del 31% de energía eléctrica mientras que en el Fresh Food Lab fue del 20%.

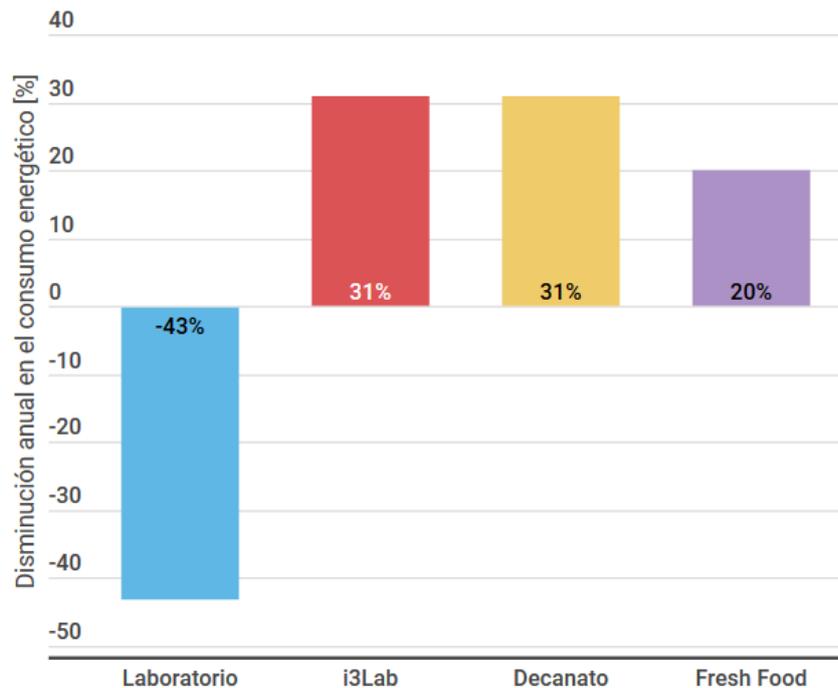


Figura 3.3. Comparación en el desempeño energético del VRV versus la línea base

Fuente [Elaboración propia]

De la misma manera, al ser la tarifa proporcional al consumo energético, se ahorra 29%, 31% y 22% respectivamente en el gasto de la tarifa eléctrica, no obstante, el Laboratorio tiene un incremento del 46% en el costo de la tarifa eléctrica lo cual se debe a que la capacidad de refrigeración instalada actualmente es demasiado baja para el espacio y

equipos utilizados en dicho edificio. Se puede ver que en general, el edificio del Decanato FICT es el mayor beneficiado de un sistema VRV.

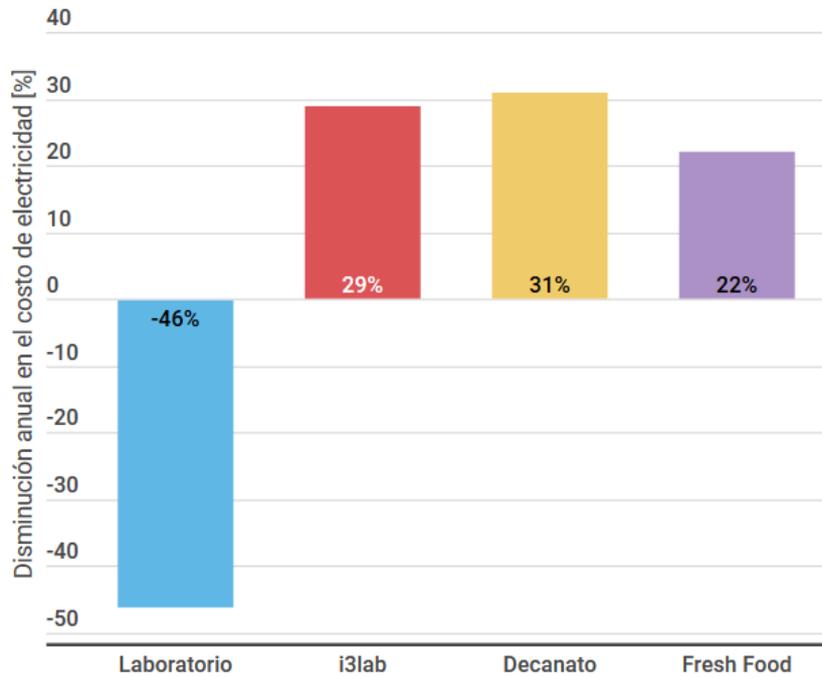


Figura 3.4. Comparación en el desempeño económico del VRV versus la línea base

Fuente [Elaboración propia]

3.4. Consumo energético del Distrito Frío

Los resultados respecto a la simulación del DC con los cuatro edificios modelados son detallados en la Tabla 11, esta información engloba toda la energía utilizada para abastecer los edificios junto con el valor de la tarifa eléctrica en el que solo se consideró los elementos del DC como el chiller y las bombas.

Tabla 3.4. Resultados del DC para 4 edificios

Consumo anual [kWh]	78,807
Porcentaje de energía en climatización	69%
Demanda pico promedio mensual [kW]	12.5
Intensidad de unidad de energía [kWh/m²]	203.60
Tarifa eléctrica [USD]	3,928.39

Fuente [Elaboración propia]

Para estos datos obtenidos se propone una planta de enfriamiento compuesta por chillers tipo centrífugo ya que el lugar de análisis al ser un Campus tiene variaciones en la carga de enfriamiento para lo cual este tipo de chillers trabajan con su máxima eficiencia ya sea para carga total o para carga parcial optimizando el consumo de energía eléctrica, y por otro lado no se dispone de tuberías para gas natural necesarias para otros tipos de chillers como el de absorción

3.5. Comparación entre sistemas de climatización

La Gráfica 5 fue utilizada para comparar, en base al número de edificios, el consumo energético anual para cada uno de los sistemas de climatización analizados. Los resultados mostraron que la línea base fue el de mayor consumo anual, mientras que el sistema DC demostró ser el más eficiente de todos. En el caso particular del DC se pudo observar que a medida que aumentaba la carga de climatización el ahorro energético respecto a la línea base fue incrementando cada vez más.

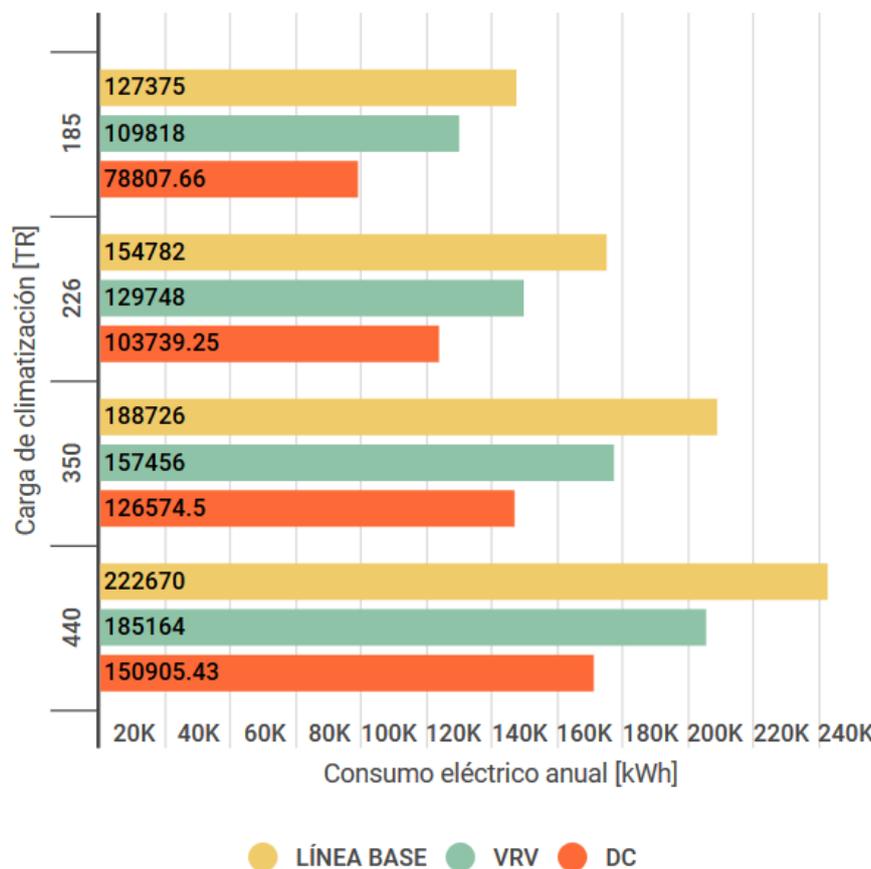


Figura 3.5. Comparación de consumo energético dependiendo del número de edificios

Fuente [Elaboración propia]

Esta relación se pudo apreciar mejor en la Gráfica 6, en donde se vio que para 185 TR el ahorro energético fue de 48,567 kWh/año mientras que con 440 TR llegó casi a 72,000 kWh/año, superando el ahorro energético del VRV. El coeficiente de determinación fue de 0.9948, lo que implica que el modelo se ajusta muy bien al comportamiento de las variables en la vida real.

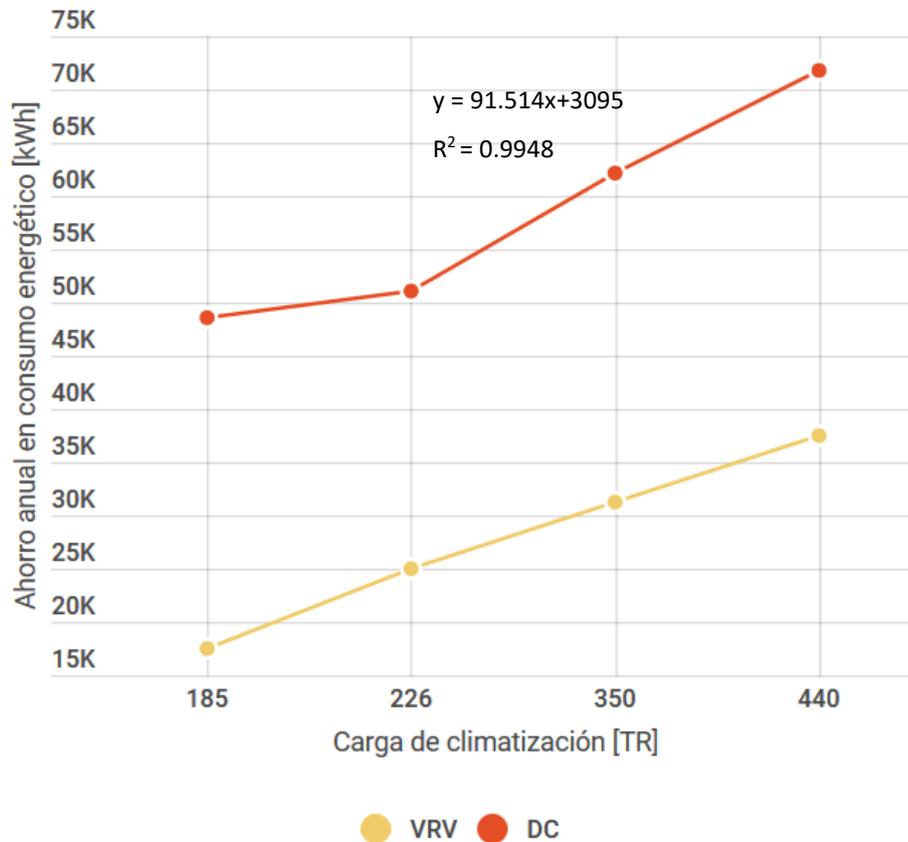


Figura 3.6. Ahorro energético del DC comparado con la línea base

Fuente [Elaboración propia]

El Gráfico 7 muestra el costo de la tarifa eléctrica para cada uno de los escenarios. Igual que en el análisis anterior, el DC mostró su supremacía sobre los demás. Lógicamente, la línea base fue el más costoso mientras que, similar al consumo energético, el DC mostró un incremento en el ahorro anual con cada subida de la carga térmica, lo cual fue representado en el Gráfico 8 junto con la relación del VRV. El coeficiente de determinación también fue cercano a 1.

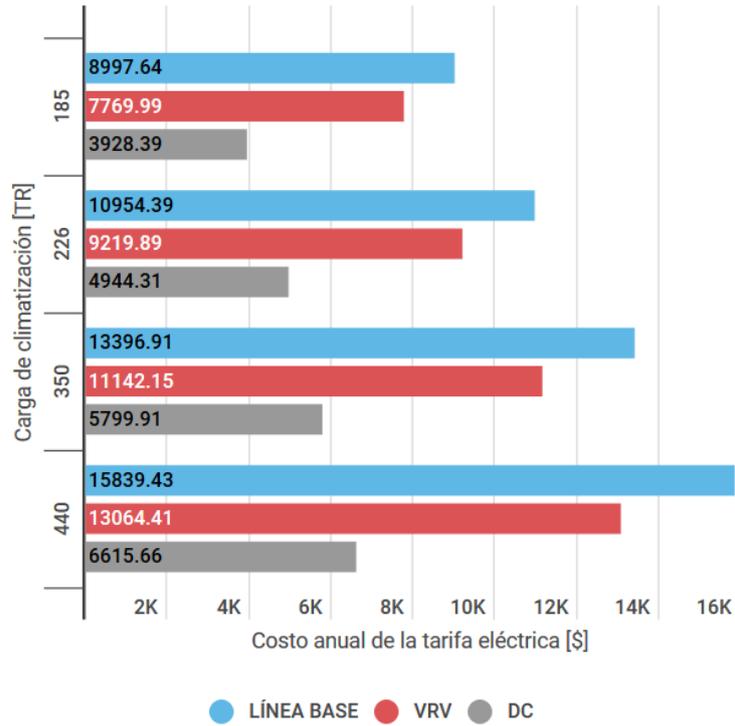


Figura 3.7. Comparación del costo de la tarifa eléctrica para cada escenario

Fuente [Elaboración propia]

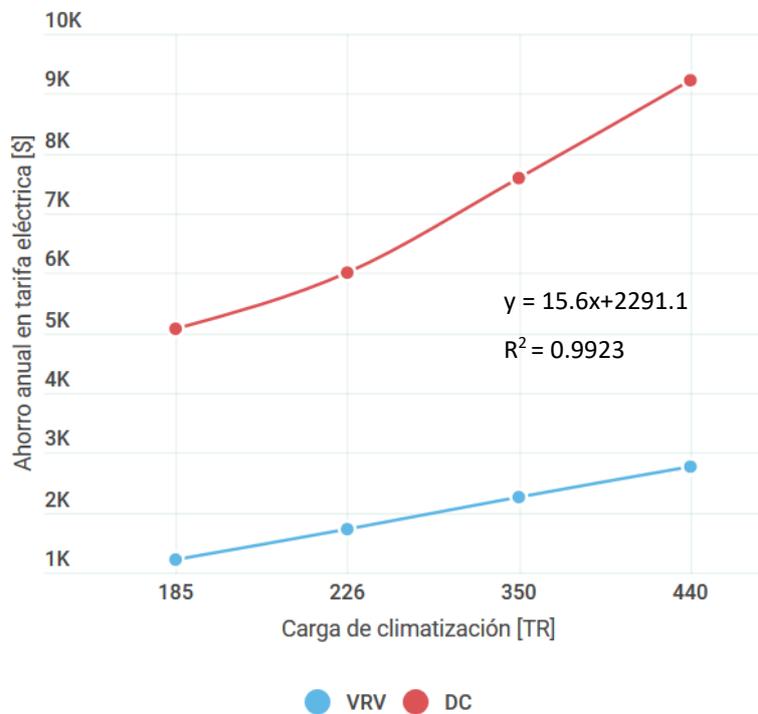


Figura 3.8. Ahorro económico del DC comparado con la línea base

Fuente [Elaboración propia]

Tal como se mencionó en la teoría, los DC representan una solución más sostenible, por este motivo se realizó el Gráfico 9 en el cual se ve cómo la huella de carbono fue variando a medida que aumentaban las toneladas de refrigeración. En este se trazó la cantidad de CO₂ en kg que el DC terminó ahorrando en comparación con la línea base para una misma carga térmica. Como era de esperarse, la curva sigue el mismo comportamiento del Gráfico 6 ya que las emisiones de carbono están directamente relacionadas con el consumo energético. Así, por ejemplo, para una demanda inicial de 185 TR el distrito ahorra aproximadamente 14,000 kg de CO₂ al año mientras que, en 440 TR las emisiones del contaminante se reducen en un valor de 20 toneladas anuales.

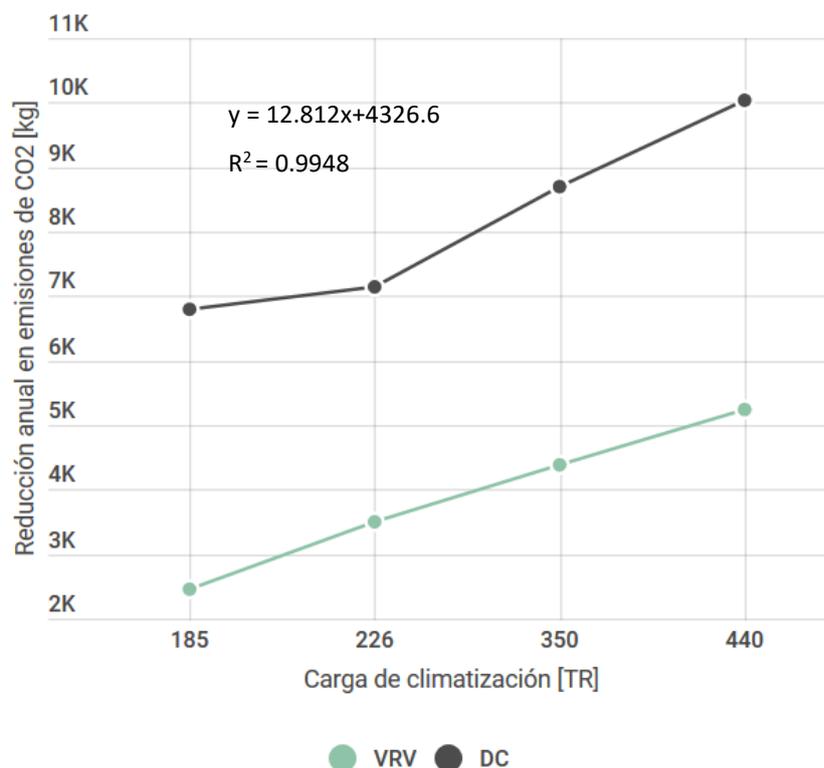


Figura 3.9. Reducción de las emisiones de CO₂ del DC comparado con la línea base

Fuente [Elaboración propia]

El Gráfico 10 expone un resumen de lo que ha sido explicado hasta aquí respecto al DC, en el que se detalla el porcentaje del ahorro energético, económico y ambiental a medida que aumentaron las toneladas de refrigeración del conjunto de edificios. El Gráfico 11 muestra lo mismo pero aplicado para el VRV.

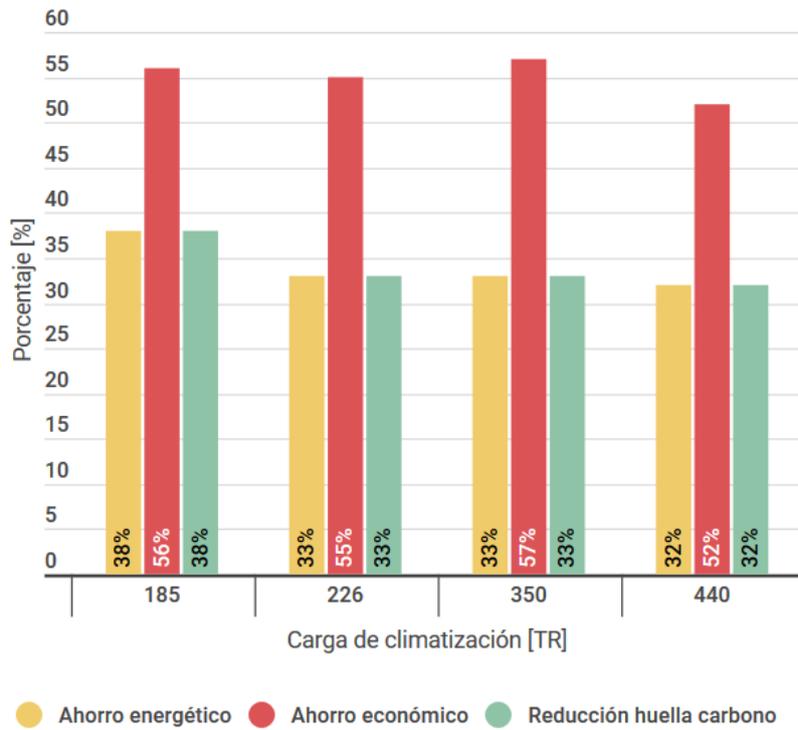


Figura 3.10. Resumen de los beneficios del DC vs la línea base
Fuente [Elaboración propia]

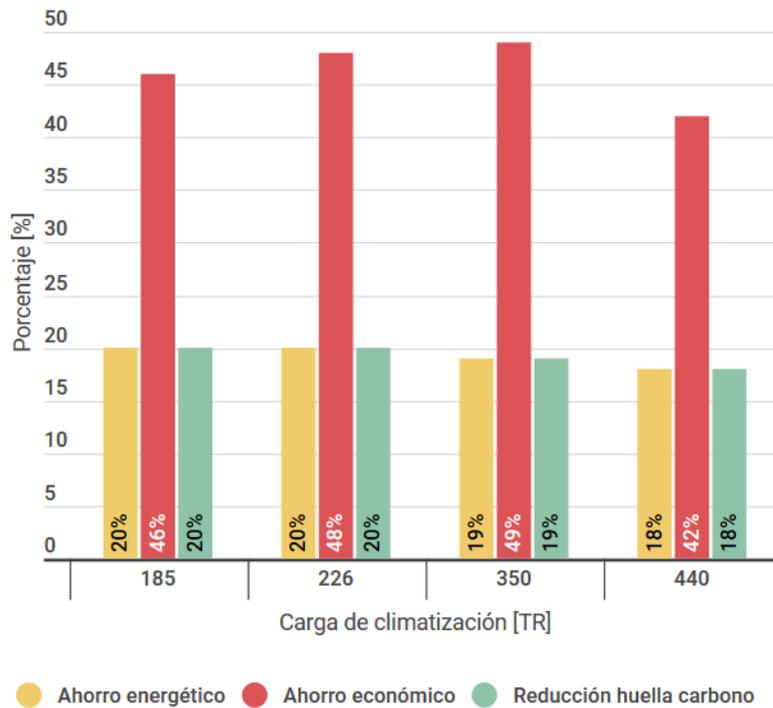


Figura 3.11. Resumen de los beneficios del VRV vs la línea base
Fuente [Elaboración propia]

La Tabla 12 y 13 muestran el ahorro energético, económico y ambiental del VRV en los 4 edificios analizados y un DC implementado en todo el campus en comparación con la línea base. Vale la pena recalcar que la universidad cuenta con aproximadamente 60 edificios, pero dado que no se podía simular toda la infraestructura se decidió utilizar las ecuaciones de cada una de las curvas con la carga de climatización total estimada por el CERA en pasadas investigaciones, la cual fue de 5,000 TR.

Tabla 3.5. Beneficios anuales del VRV implementado en los 4 edificios

Ahorro	Decanato	Laboratorio	i3Lab	Fresh Food
Energético [kWh]	8,554	-9,035	13,996	6,842
Económico [USD]	611	-646	920	530
Emisiones de CO₂ [kg]	1,111	-1,175	1,820	890

Fuente [Elaboración propia]

Tabla 3.6. Beneficios de un DC implementado en 4 edificios

Beneficios	Ahorro Anual	Ahorro luego de 30 años
Energético [kWh]	48,567	1'457,020
Económico [USD]	5,070	152,077
Emisiones de CO₂ [kg]	6,800	203,983

Fuente [Elaboración propia]

Tabla 3.7. Beneficios de un DC implementado en todo el campus

Beneficios	Ahorro Anual	Ahorro luego de 30 años
Energético [kWh]	554,548	16'636,443
Económico [USD]	91,554	2'746,629
Emisiones de CO₂ [kg]	77,637	2'329,105

Fuente [Elaboración propia]

3.6. Análisis de costos

La Tabla 14 y 15 muestran los costos que representaría cambiar el sistema de climatización actual a uno VRV y a un DC respectivamente para 4 edificios con 185 TR. Dado que es un análisis a nivel de prefactibilidad se excluyeron los costos de instalación

e importación en el caso del DC ni equipos eléctricos o sistemas de control. El motivo de esto fue hallar primero si implementar este sistema en el campus tiene un alto margen de beneficio económico ya que de otra manera no tendría fundamentos indagar más en el tema por lo que solo se analizaron los elementos más costosos y críticos. En los costos de mantenimiento se utilizó una estimación de 20 USD/TR al año para los VRV mientras que para los DC fue de 9.00 USD/TR al año de acuerdo con (Darmanto et al., 2018)

Tabla 3.8. Análisis de costos para el VRV con 4 edificios

EDIFICIO	COSTO DE INVERSIÓN	AHORRO ENERGÉTICO ACUMULADO [kWh]	AHORRO ECONÓMICO ACUMULADO [USD]
Laboratorio Mecánica de Suelos	140,843.78	-108,420	-7,752
i3Lab	228,246.36	167,952	11,040
Decanato FICT	156,092.32	102,648	7,332
Fresh Food Lab	166,632.65	82,104	6,360
Subtotal	691,815.11		
Costo de diseño	69,181.51		
IVA	91,319.59		
Total	852,316.21		
Mantenimiento (anual)	3,700		

Fuente [Elaboración propia]

Tabla 3.9. Análisis de costos para un DC con 4 edificios

EQUIPO	COSTO UNITARIO [USD/TR]	SUBTOTAL [USD]
Chiller centrífugo	300.00	55,500.00
Torre de enfriamiento	30.00	7,400.00
Bombas primarias	15.00	2,775.00
Bombas secundarias	20.00	3,700.00

Unidades Manejadoras de Aire	100.00	18,500.00
Sistema de tuberías y accesorios	190.00	35,150.00
Tuberías principales	91.00	16,835.00
Costo de capital	-	139,986.00
Costo de diseño	10% del capital	13,986.00
Subtotal	-	153,846.00
IVA	-	18,461.52
Total	-	172,307.52
Mantenimiento (anual)	9.00	1,665.00

Fuente [Darmanto et al., 2018]

Se realizó un último análisis de costos para la implementación de un DC en la universidad para lo cual la carga de enfriamiento fue de 5,000 TR y los resultados se pueden apreciar en la Tabla 16, los costos para el chiller y sistema de tuberías se vieron reducidos debido a la economía de escala.

Tabla 3.10. Análisis de costos para un DC implementado en todo el campus

EQUIPO	COSTO UNITARIO [USD/TR]	SUBTOTAL [USD]
Chiller	200	1'000,000.00
Torre de enfriamiento	30.00	150,000.00
Bombas primarias	15.00	75,000.00
Bombas secundarias	20.00	100,000.00
Unidades Manejadoras de Aire	100.00	500,000.00
Sistema de tuberías y accesorios	170.00	850,000.00
Tuberías principales	91.00	455,000.00
Costo del capital	-	3'130,000.00
Costo de Diseño	10% del capital	313,000.00
Subtotal	-	3'443,000.00

IVA	-	413,160.00
Total	-	3'856,160.00
Mantenimiento (anual)	9.00	45,000.00

Fuente [Darmanto et al., 2018]

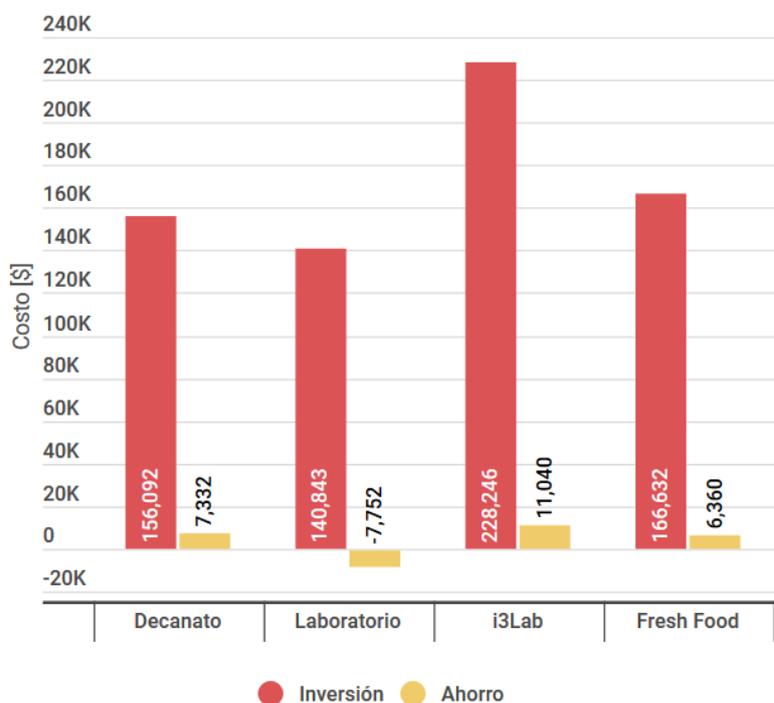


Figura 3.12. Rentabilidad del sistema VRV

Fuente [Elaboración propia]

En primera instancia, al comparar el costo total de la implementación del DC con el ahorro económico se encontró que hubo un déficit de USD 1'109,531. Se podría decir que el instalar dicha infraestructura dentro de la universidad no está justificado, sin embargo, se analizaron los costos únicamente en equipos de acondicionamiento de aire de la Biblioteca Central, Edificio Financiero, Fresh Food Lab y Rectorado, los cuales representan el 22% de la carga total del DC. Todos estos edificios cuentan actualmente con unidades paquete, Split de ducto, Split de pared y aires de ventana. Al final se encontró que reemplazar todos los equipos costaría alrededor de USD 831,000, un precio que no está muy alejado del déficit del distrito. Cabe recalcar que en dicho valor no constó el precio de instalación, ductos, diseño, etc. por lo que se espera que suba aún más. Esta tabla se puede encontrar al final en los apéndices.

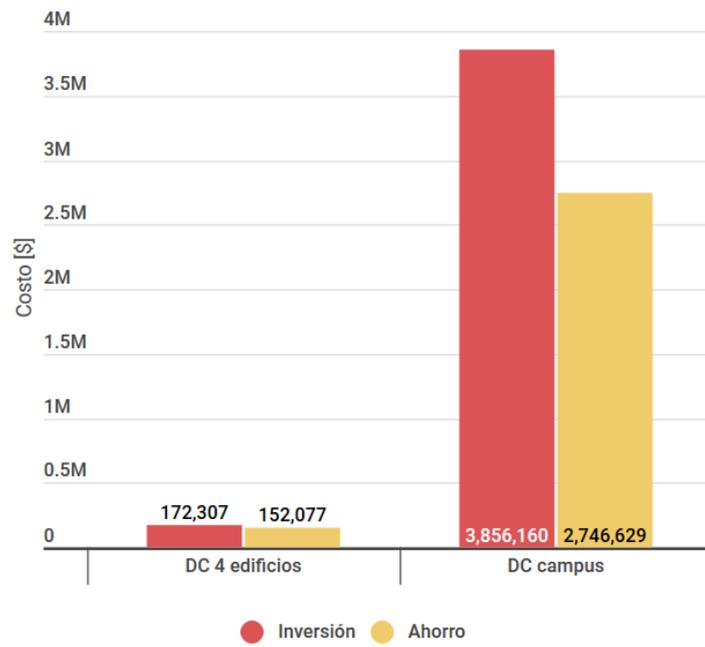


Figura 3.13. Rentabilidad del sistema DC

Fuente [Elaboración propia]

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema actual de acondicionamiento de aire en la mayoría de los edificios del Campus Gustavo Galindo cuenta con equipos de tecnología ya obsoleta que consumen grandes cantidades de energía e incrementa las emisiones de CO₂ al medio ambiente. Para mitigar estos problemas, se realizó un estudio que analice la prefactibilidad de usar soluciones más sostenibles como los VRV o el distrito de frío, que funcionan de manera más eficiente.

Al final los resultados fueron favorables ya que estos muestran que hay un ahorro en el aspecto económico y energético, así como una reducción en la huella de carbono, siendo el DC el sistema más eficiente de todos. Con esto podemos concluir que se debería realizar otro estudio más detallado en el cual se puedan evaluar el resto de las variables de este sistema propuesto, como caídas de presión, pérdidas de calor mediante tuberías o el tipo de topología, para de esta manera tener valores más precisos respecto a la implementación, así como, los ahorros en los diferentes aspectos mencionados.

Fue importante realizar un análisis a nivel de prefactibilidad debido a la gran cantidad de edificios dentro del Campus, de manera que se vuelve en un trabajo bastante laborioso el recolectar la información, modelar cada uno de estos con su respectiva simulación y el diseño de un distrito que termine abasteciéndolos a todos. En consecuencia, para un estudio mucho más profundo se requieren de más recursos como personal de trabajo, sistemas de cómputo más poderosos y un plazo mucho más extenso.

4.1. Conclusiones

A partir de la información recolectada de cada edificio se pudo desplegar su consumo energético, en donde encontramos que en la mayoría de ellos más del 45% de la electricidad es demandada únicamente por los sistemas HVAC actuales por lo que es de gran importancia mejorar el rendimiento de estos, evaluando la posibilidad de implementar una nueva tecnología que disminuya este consumo.

En este análisis se consideraron tres propuestas: la línea base, el VRV y el DC implementados en el Decanato FICT, Fresh Food Lab, i3Lab y Laboratorio de Mecánica de Suelos. Con el primer sistema se obtuvo un consumo aproximado de 223 kWh anuales mientras que, el sistema VRV y el DC consumieron 186 kWh y 150 kWh al año respectivamente. Claramente se pudo observar una disminución del consumo energético con respecto a la línea base de 17kWh al año para el segundo sistema y 48 kWh anuales para el último, consecuentemente los costos generados y las emisiones de CO₂ también disminuyeron debido a que están directamente relacionados, siendo el DC el que brindó mayores beneficios con respecto a los equipos actuales.

Los resultados finales de este análisis mostraron que el distrito, en comparación con la línea base para los 4 edificios con una carga de climatización total de 185 TR, obtuvo un 38% de ahorro energético, una reducción en la huella de carbono de la misma proporción y un 56% de ahorro económico. Cuando se realizó el mismo análisis entre el sistema VRV y el DC se vio que el segundo fue superior un 20% respecto al ahorro energético y en reducción de emisiones de carbono junto con un 46% de ahorro energético en comparación con el primero. A pesar de lograr índices tan positivos, el costo de implementación terminó siendo mayor que el ahorro por un monto igual a USD 1'109,531, por lo que el proyecto no fue capaz de devengar la inversión luego del periodo de vida de 30 años.

Dicho esto, antes de dictaminar si es justificado o no la instalación del DC se indagó en el inventario del CERA, en donde se encontraron todos los equipos HVAC de 4 edificios del campus, los cuales fueron el Rectorado de la universidad, el edificio Financiero, la Biblioteca Central y el Fresh Food Lab, los cuales en conjunto representaron el 22% de la carga total del distrito en el campus, en donde se halló que reemplazarlos por la misma línea base requeriría de una inversión de USD 831,000. Dentro de esta cotización no se incluyeron los ductos, accesorios o diseño. Ni siquiera se consideró la instalación, la cual puede aumentar el precio total entre un 40-50% (*2020 HVAC System Costs | Installation & Replacement Cost Estimator*, s. f.). Con esto se pudo verificar que, si bien es cierto que el DC no generó suficientes ganancias que compensen la inversión, optar por esta opción sigue siendo más barato que mantener la línea base.

Una vez concluida esta parte se propuso el determinar la razón por la cual los DC logran ser rentables en otras partes del mundo mientras que en la universidad no se lo logró. Se encontró que en la mayoría de estos países existen leyes que terminan favoreciendo su implementación. Como primer caso, se consideró el distrito de La Alpujarra en Colombia, en donde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con otras entidades ayudaron al diseño y construcción de este, exceptuándolo de IVA y otros impuestos. De igual manera, el costo de la tarifa eléctrica para el DC también está libre de cualquier impuesto, lo que aumenta el margen de ganancia. (*Distritos Térmicos de Frío—El Futuro del Confort en Colombia | LinkedIn*, s. f.)

Esta tendencia fue replicada de modelos europeos, donde está el caso de Suecia, que a partir del año 2008 dictaminó que los distritos energéticos, así como las plantas de cogeneración, paguen 15%, en vez de 21%, en el impuesto general de carbono y un 6% menos en el impuesto general del país, y en caso de demostrar grandes beneficios ambientales, estos pueden seguir reduciéndose. (Ericsson, 2009).

Finalmente, al comparar el costo del kWh en la ESPOL con el de estos países se encontró que la energía es relativamente cara fuera del Ecuador. En Suecia se cobra 22 centavos de dólar mientras que en Colombia 16 centavos. (*El costo de la energía en Colombia—Red de Desarrollo Sostenible de Colombia*, s. f.) Estados Unidos es una de las naciones que más ha innovado en esta tecnología y mantiene una tarifa promedio de 17 centavos por cada kWh. En los resultados encontramos que el DC logra un ahorro económico del 56% pero con un costo de 6 centavos, que es la tarifa diferenciada para la universidad, este monto termina estando muy por debajo de lo que se alcanzaría con cualquiera de los precios antes mencionados, reduciendo así su margen de ganancia.

Respecto al sistema VRV, de acuerdo con el Gráfico 11, se pudo notar que hay un ahorro económico del 46% para el escenario con 4 edificios, no obstante, los beneficios mostrados en la Tabla 12 reflejan que instalarlo no es rentable luego del periodo de 12 años que representa su ciclo de vida cuando lo comparamos con los costos de la Tabla 14. Esto se debe a que el consumo energético de estos cuatro es relativamente bajo y no justifica el implementar equipos tan sofisticados porque no existe un retorno de inversión.

4.2. Recomendaciones

Las simulaciones para todos los sistemas de climatización fueron realizadas considerando que operaban durante todo el año exceptuando fines de semana, por lo que, al ser edificios educativos e institucionales se debería tener en cuenta los periodos vacacionales y feriados, lo que implica una reducción en el consumo de energía con lo cual se obtendría un valor más cercano al real para un posterior análisis.

A pesar de haber obtenido datos acerca del consumo energético del DC y su respectivo costo en la tarifa eléctrica para de esta manera poder compararlo con el resto de los sistemas, se debería utilizar algún otro programa que permita realizar cálculos hidráulicos en donde se pueda apreciar la variación de la caída de presión en las tuberías y de esta manera determinar la ubicación y potencia de las bombas. Todos estos factores harán al modelo mucho más real, lo que hará que los beneficios incrementen debido a que no se sobredimensionarían los equipos.

Otro punto por considerarse con respecto al programa utilizado para la simulación es la topología de red, si bien es cierto que la distribución radial es la más viable en el campus debido a su baja demanda en comparación con los distritos industriales en el resto del mundo, en donde se requieren alrededor de 100,000 TR (ASIAN DEVELOPMENT BANK, 2017), se debería evaluar las otras configuraciones de anillo y mallado, en donde podrían aparecer otros aspectos relevantes para la elección y tener valores más exactos para el cálculo de la cantidad de tubería necesaria con su respectivo costo.

Uno de los aspectos más importantes de la simulación es la capacidad de memoria RAM que demandan los modelos, haciendo que los tiempos de espera sean bastante prolongados, lo que entorpece el proceso iterativo en ciertas situaciones, por lo que se debería investigar maneras que faciliten esto. Una de las opciones recomendadas es la de los modelos de ordenes reducidos (ROM) lo cual permite transformar los modelos asistidos por computadora en estadísticos a partir de programación en Python, haciéndolos de esta manera más simples, menos pesados y más fáciles de administrar dentro del DC, consiguiendo que el tiempo de simulación disminuya significativamente (Long, 2018).

Se pensó durante el diseño del DC el colocar a la planta central cerca del Lago ESPOLO para de esta manera aprovecharlo como fuente y sumidero del sistema. Investigaciones han demostrado que utilizar almacenamientos térmicos pueden reducir los costos en la capacidad de los enfriadores en un 12% (Berbari, 2016) y al usar un recurso natural se ahorraría mucho dinero en infraestructura. Antes de considerar incluirlo definitivamente en el distrito se recomienda realizar un estudio previo que analice el volumen de agua disponible que logra absorber el calor descargado y verificar si existe un aumento significativo en la temperatura del cuerpo de agua ya que esto podría afectar tanto en el funcionamiento al elevar la temperatura de ingreso del fluido como su equilibrio ecológico respecto a la flora y fauna local.

Por otro lado, se debería evaluar la configuración de tuberías a utilizarse ya sea simple, de retorno directo o invertido, y su respectiva distribución e implementación no solo en el aspecto económico sino también en el aspecto ecológico pues el campus se encuentra dentro de un área protegida lo que conllevaría un estudio más riguroso para evitar problemas de funcionamiento dependiendo del sistema y daños al ecosistema. Esta es otra razón para cambiar el programa, ya que OpenStudio solo admite una configuración de retorno directo.

Respecto a la instalación del sistema DC, se debería realizar planos más detallados en los cuales se muestre la distribución de tuberías en el interior de cada edificio junto con las unidades manejadoras de aire. De la misma manera, se debería considerar un diseño detallado de la planta central, ya que en este estudio se utilizó un modelo reducido provisto por el programa ya que se enfocó más en el desempeño de todo el conjunto.

Para el caso de los costos de los equipos requeridos para la instalación del sistema DC, se recomienda conocer el valor de la importación correspondiente puesto que la mayoría de estos no se encuentran disponibles en el mercado local debido a sus enormes capacidades, haciendo que el valor de adquisición incremente con respecto a los cotizados en este análisis. Adicional, se debe tener en cuenta el costo del sistema eléctrico y de control necesarios para el funcionamiento apropiado del distrito.

BIBLIOGRAFÍA

- 12.5 Ton Daikin Two Speed Central Air Package Unit 3 Phase, 208/230V DCC150XXX3VXXX or 460V DCC150XXX4VXXX.* (s. f.). Recuperado 22 de enero de 2020, de <https://www.budgetheating.com/12-5-Ton-Daikin-Central-Air-Package-Unit-208-230V-p/172057.htm>
- 2020 Air Conditioning Installation | Air Conditioning Replacement | AC Unit Cost.* (s. f.). Recuperado 22 de enero de 2020, de <https://www.improvenet.com/r/costs-and-prices/ac-unit-installation-cost-estimator>
- 2020 HVAC System Costs | Installation & Replacement Cost Estimator.* (s. f.). HomeGuide. Recuperado 19 de enero de 2020, de <https://homeguide.com/costs/hvac-cost>
- Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V., & Evins, R. (2015). A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1391-1404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123>
- ASHRAE Handbook—HVAC System and Equipment.* (2008).
- ASIAN DEVELOPMENT BANK. (2017). *DISTRICT COOLING IN THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA: Status and development potential.* ASIAN DEVELOPMENT BANK.
- Barbari, G. (2016). *District Cooling 2016 A Climate Solution.*
- Boldt, J., & Keen, J. (2015). *ASHRAE Journal. Hydronics 101.*
- Carreras Bertran, A. (2013). *Energy System and Economic Analysis of District cooling in the city hall of Gävle—Buscar con Google* [University of Gavle]. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Energy+System+and+Economic+Analysis+of+District+cooling+in+the+city+hall+of+G%C3%A4vle>
- Darmanto, P. S., Sutanto, N. J., Astina, I. M., & Marjianto, A. (2018). *Study of the district cooling implementation opportunity in Jakarta.* 020029. <https://doi.org/10.1063/1.5046613>
- District Cooling.* (s. f.). Comfort Futures. Recuperado 5 de noviembre de 2019, de <http://www.comfortfutures.com/district-cooling>
- El costo de la energía en Colombia—Red de Desarrollo Sostenible de Colombia.* (s. f.). Recuperado 19 de enero de 2020, de <https://www.rds.org.co/es/novedades/el-coste-de-la-energia-en-colombia>
- EnergyPlus | EnergyPlus.* (s. f.). Recuperado 10 de diciembre de 2019, de <https://energyplus.net/>
- Ericsson, K. (2009). *Introduction and development of the Swedish district heating systems.*

ESPOL - Mapa del campus. (s. f.). Recuperado 4 de noviembre de 2019, de <http://www.espol.edu.ec/es/mapa-del-campus>

ESP-r. (s. f.). Recuperado 10 de diciembre de 2019, de <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

International District Energy Association. (2008). *District cooling best practice guide*. International District Energy Association.

Litardo, J., Hidalgo-Leon, R., Macias, J., Delgado, K., & Soriano, G. (2019). *Estimating energy consumption and conservation measures for ESPOL Campus main building model using EnergyPlus*. 6.

Long, N. (2018). *Reduced Order Models for Rapid Analysis of Ambient Loops for Commercial Buildings*. 206.

Olama, A. A. (2017). *District cooling: Theory and practice*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (2018). A comparison of six metamodeling techniques applied to building performance simulations. *Applied Energy*, 211, 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.102>

Otto, M., Subratty, D., Riahi, L., D'Angiolini, G., Carqueija, P. F. P., Farrell, T., Hickman, B., & Lightburn, P. (s. f.). *Energía de Distrito en las ciudades*. 12.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>

PricewaterhouseCoopers. (s. f.). *Cooling our world: How to increase district cooling adoption through proven regulation*. PwC. Recuperado 5 de noviembre de 2019, de <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/cooling-our-world.html>

Ravti. (2016, septiembre 9). *Equipment—Packaged Rooftop Unit (RTU)*. Medium. <https://blog.ravti.com/equipment-packaged-rooftop-unit-rtu-52c22a055c8b>

Sistema VRF cubierta de cassette de flujo unidad Ronda – Your Comfort Air, We Dekon Care! (s. f.). Recuperado 15 de diciembre de 2019, de <https://vrfchina.com/2017/08/25/sistema-vrf-cubierta-de-cassette-de-flujo-unidad-ronda/>

Toshiba Vrf Vrv Systems. (s. f.). Indiamart.Com. Recuperado 14 de diciembre de 2019, de <https://www.indiamart.com/proddetail/toshiba-vrf-vrv-systems-13917471188.html>

Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>

Velásquez, A. E., & Alzamora, Y. (2017). *District cooling marches on in Colombia*. 21.

von Rhein, J. (2018). *Modeling, simulation and life-cost analysis of Fifth generation district heating and cooling (5GDHC) networks*. University of Colorado.

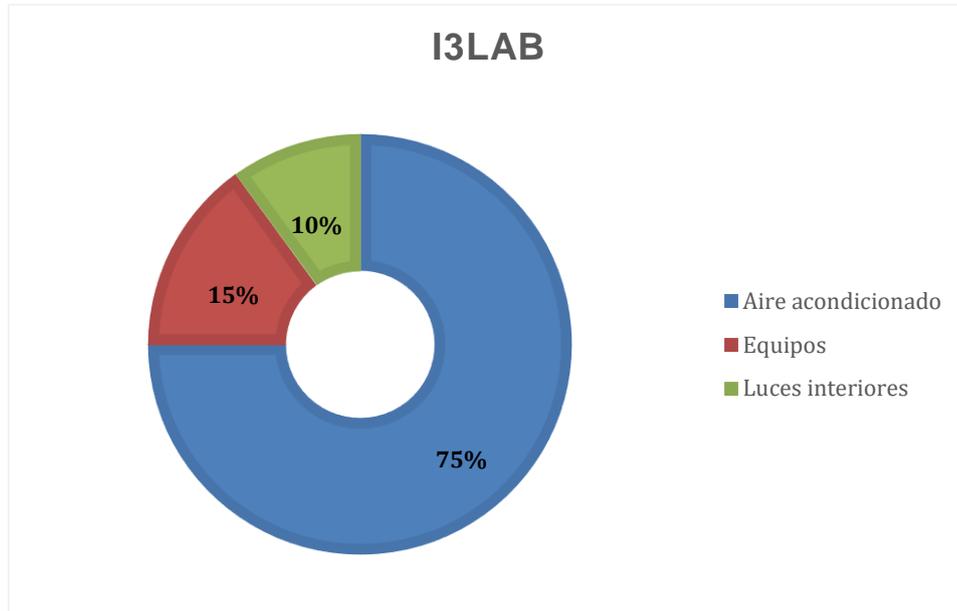
VRV or VRF ? Learn About The Differences And VRF System Design. (s. f.). CoolAutomation.Com. Recuperado 14 de diciembre de 2019, de <https://coolautomation.com/blog/vrv-or-vrf/>

Wang, H., Wang, H., & Zhu, T. (2017). A new hydraulic regulation method on district heating system with distributed variable-speed pumps. *Energy Conversion and Management*, 147, 174-189. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.059>

Welcome | TRNSYS : Transient System Simulation Tool. (s. f.). Recuperado 10 de diciembre de 2019, de <http://www.trnsys.com/index.html>

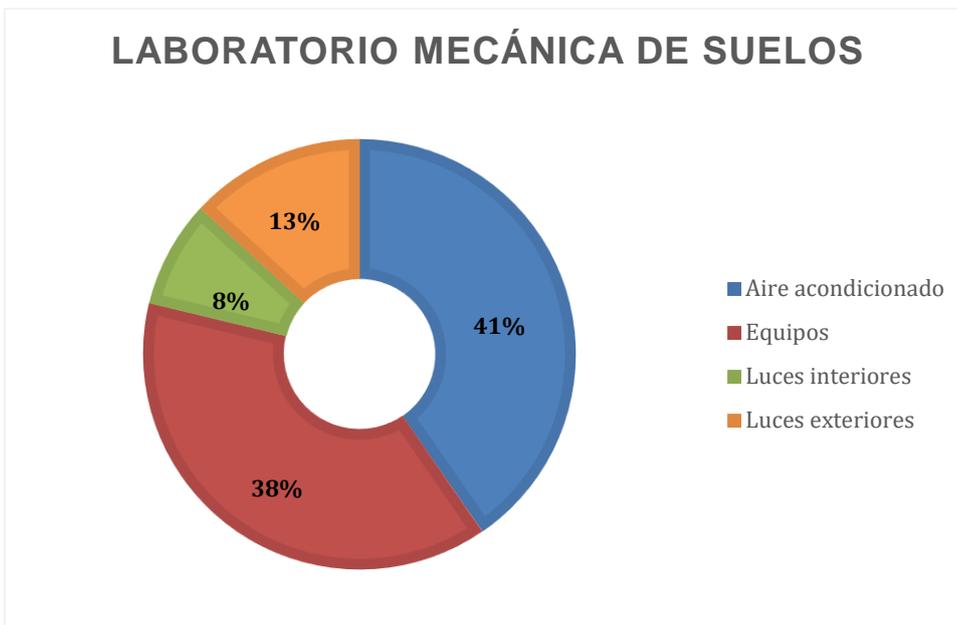
APÉNDICES

APÉNDICE A: Resultados energéticos del sistema HVAC actual



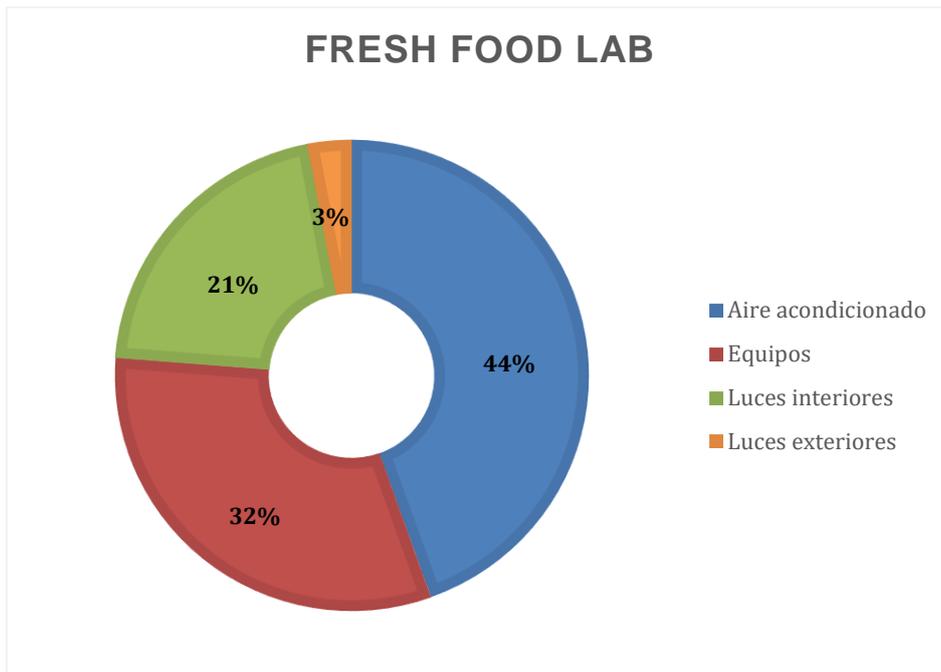
Consumo energético según el uso en i3Lab

Fuente [Elaboración propia]



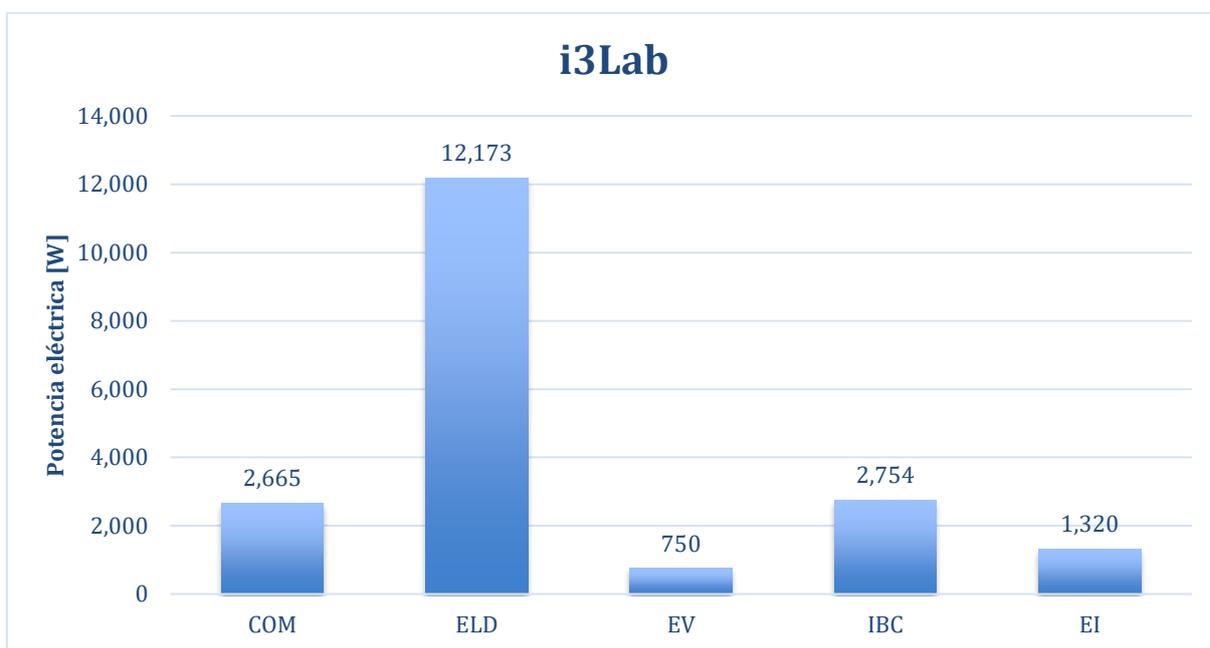
Consumo energético según el uso en el laboratorio

Fuente [Elaboración propia]



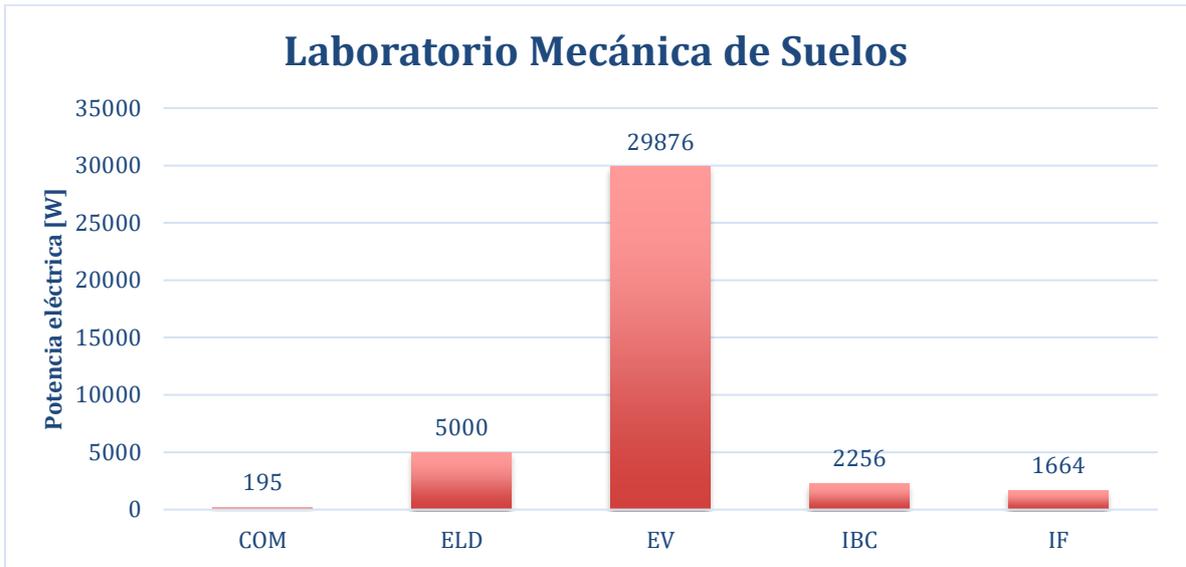
Consumo energético según el uso en Fresh Food

Fuente [Elaboración propia]



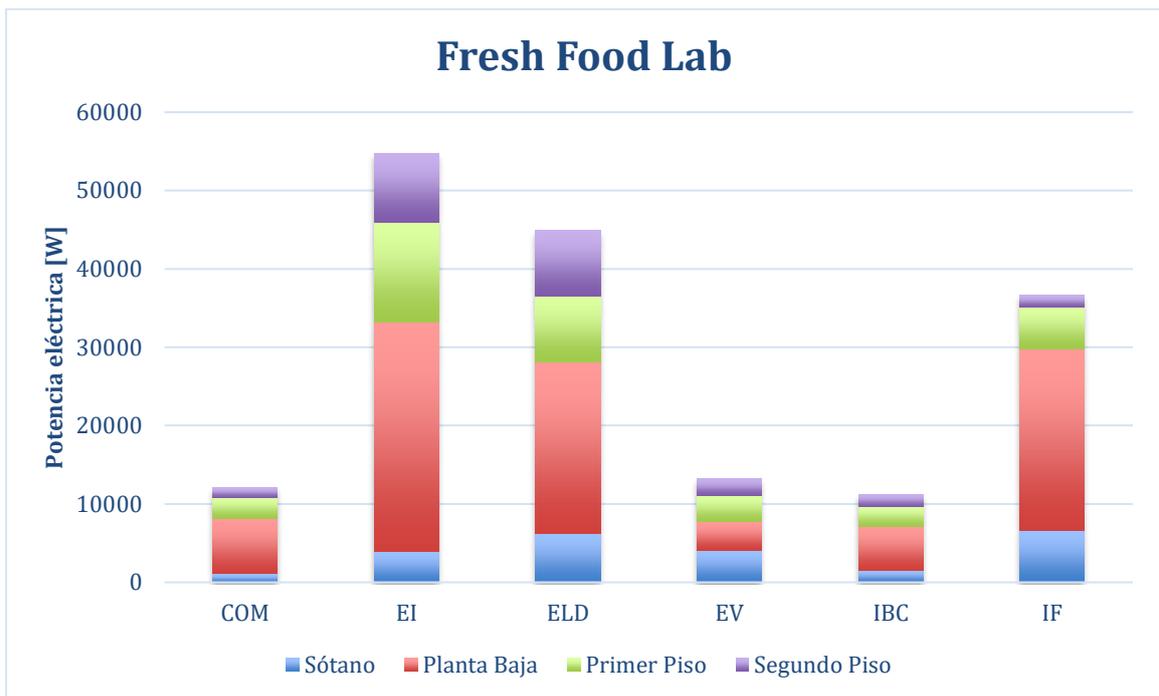
Energía utilizada en equipos e iluminación en i3Lab

Fuente [Elaboración propia]



Energía utilizada en equipos e iluminación en el Laboratorio

Fuente [Elaboración propia]



Energía utilizada en equipos e iluminación en Fresh Food AB

Fuente [Litardo et al., 2019]

APÉNDICE B: Lista de materiales de sistemas VRV

Lista de materiales sistema VRV en i3Lab

Modelo	Cantidad	Descripción
RXYQ144TATJU	1	Bomba de calor VRV IV 220V(TATJU)
RXYQ168TATJU	1	Bomba de calor VRV IV 220V(TATJU)
FXFQ40AVE	6	VRV FA – Cassette de techo (Flujo redondo)
FXFQ71AVE	3	VRV FA - Cassette de techo (Flujo redondo)
FXMQ250MVE9	2	VRV M – Ventiloinvector
KHRP26A22T	5	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26A33T	2	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M72TU	1	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M73TU	2	Kit de tuberías de rama Refnet
BRC1E62	9	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BRC1E63	2	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BYCP125K-W1	9	Panel de decoración
BHFP22P100U	1	Kit de tuberías de conexión múltiple de la unidad exterior
R410A	15.3kg	Cargo extra refrigerante
Tubería ¼"	10.1m	
Tubería ⅜"	59.6m	
Tubería ½"	10.1m	
Tubería ⅝"	22.6m	
Tubería ¾"	21.5m	
Tubería 7⁄8"	23.9m	
Tubería 1⅛"	1.8m	
Tubería 1⅜"	6.7m	
Costo total		

Fuente [SISMECAN, 2019]

Lista de materiales sistema VRV en Decanato FICT

Modelo	Cantidad	Descripción
RXYQ144TATJU	2	Bomba de calor VRV IV 220V(TATJU)
FXFQ100AVE	2	VRV FA – Cassette de techo (Flujo Redondo)
FXFQ32AVE	4	VRV FA – Cassette de techo (Flujo Redondo)
FXFQ40AVE	5	VRV FA – Cassette de techo (Flujo Redondo)
FXFQ50AVE	1	VRV FA – Cassette de techo (Flujo Redondo)
FXFQ63AVE	1	VRV FA – Cassette de techo (Flujo Redondo)
FXMQ140PVE	1	VRV M – Ventiloinconvector
KHRP26A22T	3	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26A33T	4	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M72TU	5	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M73TU	1	Kit de tuberías de rama Refnet
BRC1E62	13	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BRC1E63	1	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BYCP125K-W1	13	Panel de decoración
BHFP22P100U	1	Kit de tuberías de conexión múltiple de la unidad exterior
R410A	20.0kg	Cargo extra refrigerante
Tubería ¼"	34.1m	
Tubería ⅜"	48.8m	
Tubería ½"	45.2m	
Tubería ⅝"	51.9m	
Tubería ¾"	11.4m	
Tubería ⅞"	15.7m	
Tubería 1"	4.0m	
Tubería 1⅝"	1.7m	
Tubería 1¼"	23.9m	
Tubería 1⅜"	1.0m	
Costo Total		

Fuente [SISMECAN, 2019]

Lista de materiales sistema VRV en Fresh Food Lab

Modelo	Cantidad	Descripción
RXYQ120TATJU	1	Bomba de calor VRV IV 220V(TATJU)
RXYQ144TATJU	1	Bomba de calor VRV IV 220V(TATJU)
FXFQ32AVE	8	VRV FA – Cassette de techo (Flujo Redondo)
FXZQ32MVE	2	VRV Z – Cassette de techo (Flujo multi compacto)
FXZQ40MVE	8	VRV Z – Cassette de techo (Flujo multi compacto)
KHRP26A22T	8	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26A33T	6	Kit de tuberías de rama Refnet
KHRP26M72TU	2	Kit de tuberías de rama Refnet
BRC1E62	8	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BRC1E63	10	Mando a distancia con cable (controlador remoto de navegación)
BYCP125K-W1	8	Panel de decoración
BYFQ60B3W1	10	Panel de decoración
R410A	12.7kg	Cargo extra refrigerante
Tubería ¼"	63.7m	
Tubería ⅜"	23.2m	
Tubería ½"	101.0m	
Tubería ⅝"	8.3m	
Tubería ¾"	20.7m	
Tubería ⅞"	17.9m	
Tubería 1"	8.9m	
Tubería 1⅜"	4.7m	
Costo Total		

Fuente [SISMECAN, 2019]

APÉNDICE C: Diagramas de tuberías para los sistemas VRV

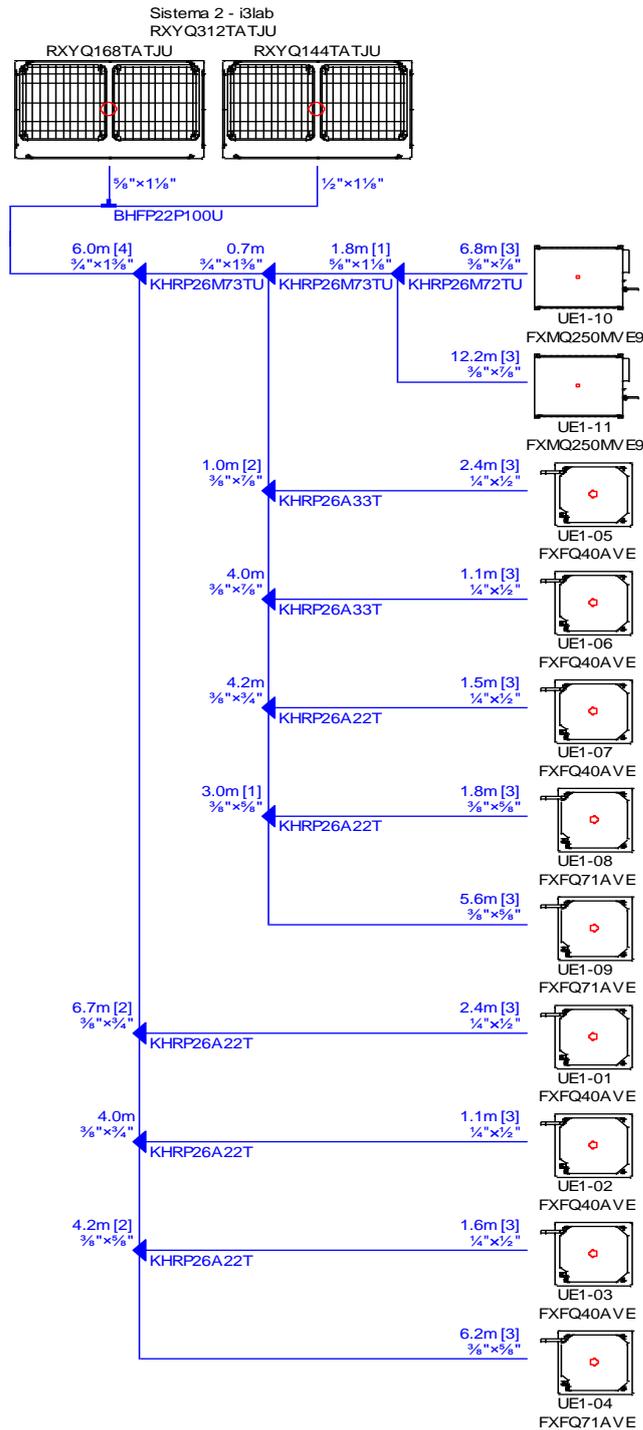


Diagrama de tuberías del i3Lab

Fuente [SISMECAN, 2019]

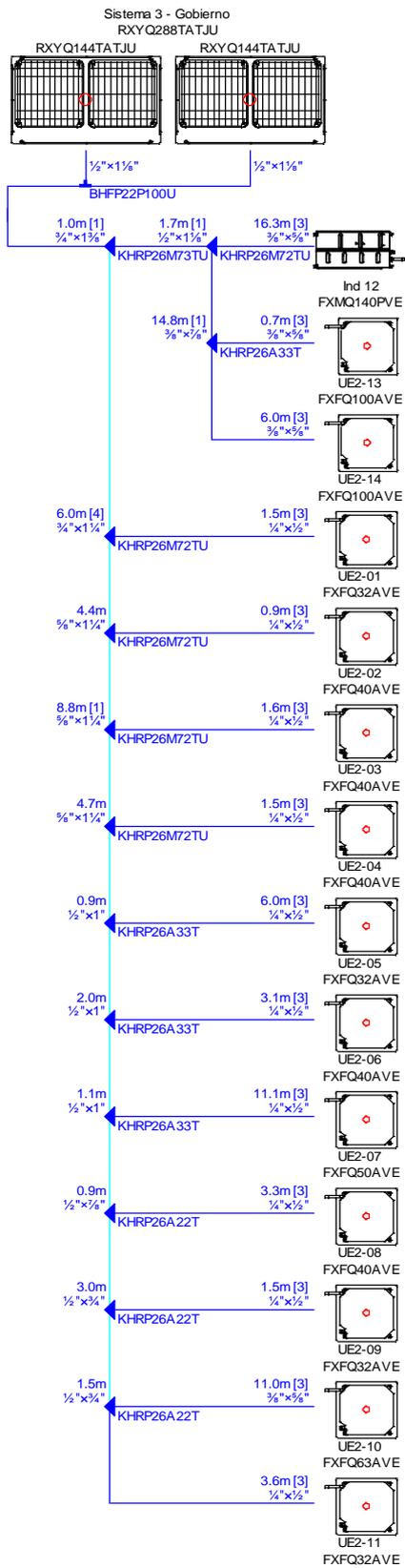


Diagrama de tuberías del Decanato FICT

Fuente [SISMECAN, 2019]

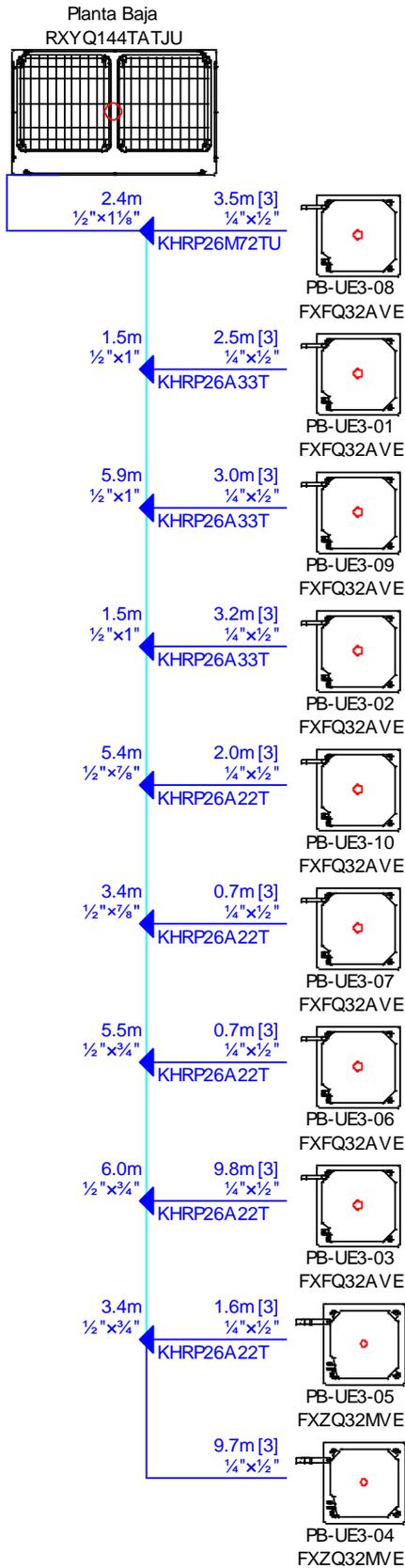


Diagrama de tuberías del Fresh Food Planta Baja
Fuente [SISMECAN, 2019]

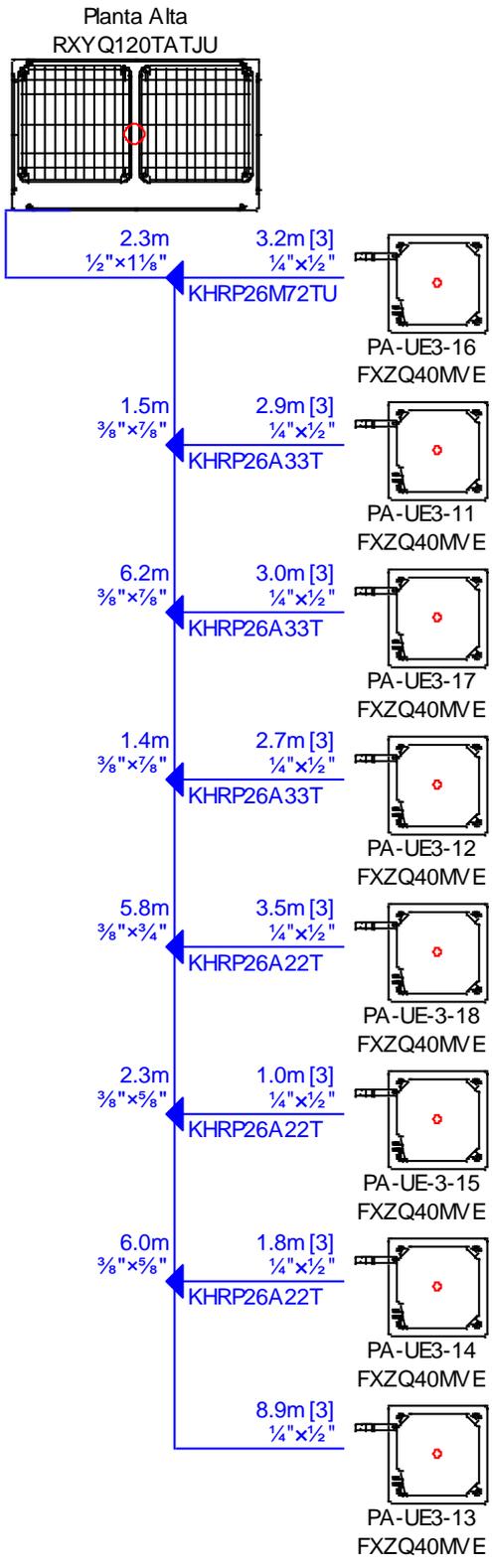


Diagrama de tuberías del Fresh Food Planta Alta

Fuente [SISMECAN, 2019]

APÉNDICE D: Equipos HVAC de algunos edificios del campus

Lista de equipos HVAC en Biblioteca, Fresh Food Lab, Financiero y Rectorado

Edificio	Tipo de Sistema HVAC	Capacidad [Btu]	Cantidad	PVP [USD]	TOTAL [USD]
Biblioteca	Aire Acondicionado Split	240000	8	17,000.00	136,000.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	48000	3	5,000.00	15,000.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	60000	15	2,230.00	33,450.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	90000	1	2,800.00	2,800.00
	Aire acondicionado Split Ducto	180000	3	5,000.00	15,000.00
	Aire Acondicionado Split Pared	12000	1	300.00	300.00
	Aire Acondicionado Split Pared	12000	1	500.00	500.00
	Aire Acondicionado Split Pared	36000	2	500.00	1,000.00
	Aire Acondicionado Split Pared	24000	4	350.00	1,400.00
	Aire Acondicionado Split Techo Piso	36000	1	945.00	945.00
	Aire Acondicionado Split Techo Piso	120000	1	1,200.00	1,200.00
	Aire Acondicionado Split Techo Piso	60000	1	1,100.00	1,100.00
	Aire Acondicionado Ventana	15000	1	200.00	200.00
	Unidad paquete	58000	1	15,000.00	15,000.00
	Unidad paquete	120000	2	10,000.00	20,000.00
	Unidad paquete	180000	4	18,000.00	72,000.00
	Unidad paquete	240000	2	25,000.00	50,000.00
	Unidad paquete	240000	1	20,000.00	20,000.00
Unidad paquete	300000	3	25,000.00	75,000.00	
				Subtotal	460,895.00
Fresh Food Lab					
	DCC120XXX4BXXXAC	120,000	2	7,167.00	14,334.00
	DCC150XXX4BXXXAB	150,000	6	8,725.00	52,350.00
	DCC090XXX4BXXXAC	90,000	1	6,475.00	6,475.00
	MSX-118-H32-DB	-	1	7,167.00	7,167.00
				Subtotal	80,326.00
Financiero	Aire Acondicionado Split Ducto	36,000	1	1,200.00	1,200.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	60,000	5	2,230.00	11,150.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	120,000	1	3,500.00	3,500.00
	Aire Acondicionado Split Pared	12,000	2	500.00	1,000.00

	Aire Acondicionado Split Pared	24,000	2	700.00	1,400.00
	Aire Acondicionado Split Pared	24,000	1	350.00	350.00
	Unidad paquete	36,000	1	1,200.00	1,200.00
	Unidad paquete	48,000	1	1,800.00	1,800.00
	Unidad paquete	60,000	1	2,000.00	2,000.00
	Unidad paquete	90,000	1	2,500.00	2,500.00
				Subtotal	26,100.00
Rectorado	Aire Acondicionado Split Ducto	48,000	1	5,000.00	5,000.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	60,000	3	2,230.00	6,690.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	120,000	2	2,980.00	5,960.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	135,000	2	3,100.00	6,200.00
	Aire Acondicionado Split Ducto	240,000	3	5,500.00	16,500.00
	Aire Acondicionado Split Pared	12,000	6	500.00	3,000.00
	Aire Acondicionado Split Pared	18,000	1	600.00	600.00
	Unidad paquete	60,000	2	3,870.00	7,740.00
	Unidad paquete	72,000	2	4,000.00	8,000.00
	Unidad paquete	120,000	2	10,000.00	20,000.00
	Unidad paquete	180,000	8	18,000.00	144,000.00
	Unidad paquete	240,000	2	20,000.00	40,000.00
				Subtotal	263,690.00
				TOTAL	831,011.00

Fuente [CERA]

Fuente [12.5 Ton Daikin Two Speed Central Air Package Unit 3 Phase, 208/230V

DCC150XXX3VXXX or 460V DCC150XXX4VXXX, s. f.]

Fuente [2020 Air Conditioning Installation | Air Conditioning Replacement | AC Unit Cost, s. f.]

APÉNDICE E: Planos del sistema VRV

A continuación, se muestran los planos detallados de cada uno de los edificios con la colocación de los cassettes y ventiloconvectores con sus respectivas tuberías de cobre y ramificaciones.



				Fecha	Nombre	Sistema VRV para el Coworking i3Lab		Escala 1/20	
				Dib.	15/1/2020				MIGUEL MEJIA
				Rev.					
				Aprob.					
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				1/1		

