

**DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y MODELADO DEL SISTEMA  
ENERGÉTICO DE UN REFRIGERADOR DC POR COMPRESIÓN DE  $0.24\text{m}^3$   
PARA LA CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS LACTEOS Y PESQUEROS  
SITUADO EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA.**



Pablo Alejandro Perafán Maca.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2017

**DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y MODELADO DEL SISTEMA  
ENERGETICO DE UN REFRIGERADOR DC POR COMPRESIÓN DE 0.24m<sup>3</sup>  
PARA LA CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS LACTEOS Y PESQUEROS  
SITUADOS EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA.**

Pablo Alejandro Perafán Maca

Director  
Msc. Luis Fernando Echeverri

Codirector  
Msc. Rodrigo Montaña.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2017

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

Director \_\_\_\_\_

Msc. LUIS FERNANDO ECHEVERRI

Jurado \_\_\_\_\_

Ing. EDUARDO ANDRÉS CAÑOLA SOTELO

Jurado \_\_\_\_\_

Msc. JULIO ANDRÉS MOSQUERA

Lugar y fecha de sustentación: Popayán, 15 de diciembre de 2017

## Resumen

Esta investigación, presenta los datos experimentales y el análisis de los resultados para la creación de un modelo matemático experimental, con ajuste por mínimos cuadrados, el cual permite determinar la energía consumida diaria de un refrigerador de corriente directa (DC) por compresión, con una capacidad neta de  $0,23 \text{ m}^3$  (240 L), siendo éste electrificado por un Sistema Fotovoltaico (SFV). Para la obtención de la energía eléctrica, se realizó la medición de corriente y voltaje en el refrigerador, estos datos se tomaron cada minuto para un total de 1440 datos de voltaje y 1440 datos de corriente por día. La adquisición se efectuó mediante un accesorio que va conectado al regulador de carga, llamado color control, éste permite enviar información por protocolo Ethernet a una página web permitiendo descargar los datos por archivos txt. Para calcular la potencia, el tiempo durante el cual el refrigerador pide potencia y la energía consumida por día, se desarrolló un algoritmo en el software MATLAB R2013b.

Las pruebas se realizaron bajo condiciones ambientales, en el SENA regional Cauca de la ciudad de Popayán. En dichas pruebas se variaron tres parámetros: Temperatura de refrigeración programada (Trp), tiempos de apertura ( $t_a$ ) y Carga de refrigeración (Cr), para obtener como respuesta la energía consumida por el refrigerador (E). Además, se registraron las medidas de temperatura interna ( $T_i$ ), temperatura en la carga ( $T_c$ ) y temperatura ambiente ( $T_a$ ), con un muestreo de 15 minutos; adicionalmente, para las pruebas de  $t_a$  se toma  $T_i$ ,  $T_a$  (y  $T_c$  si la hay) antes de abrir y después de cerrar la puerta de la nevera.

Una vez realizado el abordaje experimental y obteniendo los resultados, se compara la energía eléctrica hallada por el modelado experimental con la energía eléctrica dada por el fabricante del refrigerador en su etiqueta energética respecto a la energía eléctrica medida por el sistema de adquisición de datos (energía eléctrica verdadera), demostrando un error del dato de energía eléctrica entregado por el fabricante, atentando con la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos. Por lo anterior, este trabajo presenta una herramienta que determina mejores valores de energía eléctrica consumida por un refrigerador horizontal comparada con los datos de energía eléctrica que entrega el fabricante en su etiqueta energética, mejorando de esta forma el dimensionamiento de un SFV. También expone la necesidad de caracterizar el consumo de energía eléctrica de los refrigeradores electrificados por sistemas

fotovoltaicos, las cuales sirven para garantizar la fiabilidad de estos sistemas, permitiendo realizar un buen dimensionamiento, basado en datos reales de consumo de energía eléctrica.

**CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Aspectos generales.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4 Contribuciones.....	5
2. DISPOSITIVOS USADOS EN UNA INSTALACIÓN DE UN REFRIGERADOR DC ELECTRIFICADO POR UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DC AUTÓNOMO.....	6
2.1 Aspectos generales.....	6
2.1.1. La radiación solar.....	6
2.1.2. Sistemas fotovoltaicos.....	7
2.2. Sistema fotovoltaico autónomo DC (SFVA DC).....	7
2.2.1. Generador fotovoltaico.....	8
2.2.2. Acumulador.....	11
2.2.3. Regulador o controlador de carga.....	13
2.3.1. Los componentes principales de un sistema de refrigeración.....	14
2.3.2. El sistema de refrigeración por compresión de vapor.....	15
2.3.3. Ciclo termodinámico de refrigeración y funcionamiento del sistema.....	16
2.3.4. La carga de refrigeración.....	17
2.4. Regresión lineal Múltiple.....	19
3. Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autonomo dc.....	20
3.1. Consumo energético.....	20
3.2. Acumulador.....	21
3.3. Regulador de carga, cableado y protección.....	21
3.4. Arreglo fotovoltaico.....	22
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	24
4.1. Componentes usados y puntos de medición.....	25

4.1.1. Módulos fotovoltaicos.....	25
4.1.2. Acumulador.....	27
4.1.3. Cableado y protección.....	27
4.1.4. Sistema de refrigeración por compresión.....	28
4.1.5. Medidor de temperatura. ....	29
4.1.6. Medidor de voltaje. ....	29
4.1.7. Medidor de corriente.....	30
4.1.8. Sistema de adquisición de datos.....	30
4.2. Pre selección de variables en el experimento.....	34
4.3. Proceso experimental y Procedimiento general de pruebas.....	35
4.4. Caracterización preliminar del sistema energético de un refrigerador fotovoltaico. ....	37
4.4.2. Caracterización Generación (preliminar).....	39
4.5. Caracterización del sistema de refrigeración y SFVA.....	40
4.5.1. Gestionamiento energético del SFVA y refrigerador.....	40
4.5.2. Característica dinámica del sensor del refrigerador dc. ....	40
4.5.3. Determinar la curva de mínimo consumo energía del refrigerador.....	41
4.6. Modelado matemático experimental del sistema energético del refrigerador.....	42
4.6.1. Determinación de la dependencia de la variable dependiente $E_c$ con las variables independientes $T_{rp}$ , $t_a$ y $C_r$ .....	44
4.6.2. Modelado por regresión polinomial.....	45
4.6.3. Determinación de las fluctuaciones experimentales en la medida y refinamiento del modelado.....	45
4.6.4. Regresión lineal general.....	46
4.6.5. Balance del sistema.....	47
Regresión lineal general.....	47
4.6.6. Validación del modelado. ....	48
4.6.7. pruebas de Validación del diseño del SFVA y del modelado.....	48
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	50
5.1. Caracterización preliminar del sistema de refrigeración DC electrificado por un SFV.....	50
5.1.1. Análisis de gráfico de la caracterización consumo.....	50

5.1.2.	Análisis gráfico de la caracterización Generación.....	53
5.2.	Caracterización del sistema de refrigeración conectado al SFVA.....	55
5.2.1.	Gestionamiento energético.....	56
5.2.2.	Determinar características del refrigerador.....	57
5.3.	Modelado matemático experimental.....	61
5.3.1.	Dependencia de la Ec con Trp y tap.....	61
5.3.2.	Dependencia de Ec con Cr.....	63
5.3.3.	Modelado por regresión polinomial.....	63
5.3.4.	Análisis de la fluctuación en la medida y refinamiento del modelado.....	65
5.3.5.	Regresión lineal múltiple.....	67
5.3.6.	Balance del sistema.....	71
5.4.	Validación del diseño del SFVA y el modelado del sistema de refrigeración.....	74
6.	Conclusiones.....	82
7.	Anexos.....	84
	Anexos A. Especificaciones de equipos.....	84
	A.1. Ficha técnica del refrigerador DC por compresión, marca Steca.....	84
	Anexos B. Algoritmo.....	85
	B.1. Algoritmo en <i>Matlab</i> ®.....	85
	Anexo C. Resultados.....	87
	Resultados de las pruebas, tabla 4.10.....	87
	C.2. Resultados de las pruebas de regresión.....	88
8.	Bibliografía.....	92

## Índice de tablas.

	<b>Pág.</b>
Tabla 3.1. Componentes del SFVA. ....	23
Tabla 3.2. Componentes de SVA calculados. ....	23
Tabla 4.1. Módulos fotovoltaicos. ....	26
Tabla 4.2. Etiqueta eléctrica del CS6X7-310P.....	26
Tabla 4.3. Acumuladores usados en el experimento.....	27
Tabla 4.4. Variables de entrada y salida de adquisición. ....	31
Tabla 4.5. Variables independientes del sistema. ....	35
Tabla 4.6. Serie de pruebas variando Trp, Cr y ta.....	38
Tabla 4.8. SFVA usados en las pruebas CG. ....	39
Tabla 4.7. Pruebas realizadas en CG.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 4.9. Pruebas de caracterización del sensor del refrigerador. ....	41
Tabla 4.10. Pruebas de mínimo consumo del refrigerador. ....	42
Tabla 4.11. Pruebas donde se varía ta y Trp. ....	44
Tabla 4.12. Prueba donde se vara Cr. ....	45
Tabla 4.13. Prueba donde se varía Cr. ....	45
Tabla 4.14. Prueba donde se varía Trp y ta.....	46
Tabla 4.15. Pruebas donde se varía Trp y ta en valores intermedios. ....	46
Tabla 4.16. Pruebas donde se varía Trp y Cr.....	47
Tabla 4.17. Pruebas de validación de modelado modificando ta y Cr.....	48
Tabla 4.18. Prueba de verificación.....	49
Tabla 5.1. Diferencias de voltaje en el acumulador para pruebas con diferentes condiciones. ....	51
Tabla 5.2. Estadística de las pruebas de caracterización generación preliminar.....	54
Tabla 5.3. Pruebas de variación de Cr. ....	63
Tabla 5.4. Resumen del modelo.....	68
Tabla 5.5. Coeficientes primera regresión lineal Múltiple.....	68
Tabla 5.6. Energía consumida por el fabricante.....	69
Tabla 5.7. Comparación de errores. ....	70
Tabla 5.8. Resumen del modelo.....	72
Tabla 5.9. Coeficientes. Segundo modelado de regresión lineal múltiple. ....	72
Tabla 5.10. Comparación de errores. ....	73
Tabla 5.11. Resultados de validación de la segunda regresión lineal múltiple.....	74
Tabla 5.12. Etiquetas energéticas para refrigeradores DC horizontales. ....	76
Tabla 5.13. Etiqueta energética de la marcha fhocos.....	76

Tabla 5.14. Etiqueta energética, refrigeradores AC horizontales. ....	76
Tabla 5.15. Etiqueta energética para refrigeradores AC verticales.....	76
Tabla 5.16. Resultado de validación. Comparación de errores.....	77
Tabla 5.17. Comparación de módulos FV. ....	78
Tabla 5.18. Comparación de acumuladores. ....	79
Tabla 5.19. Comparación de reguladores de carga. ....	79
Tabla 5.20. Comparación de protecciones y cableado. ....	80

## Índice de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1. Radiación solar que incide en la tierra. Fuente propia.....	6
Figura 2.2. Diagrama jerárquico de tipos de sistemas fotovoltaicos.....	7
Figura 2.3. Esquema del sistema fotovoltaico con salida DC.....	8
Figura 2.4. Curva I-V en una célula Fotovoltaica.....	9
Figura 2.5. Sistema básico de refrigeración por compresión de vapor. ....	15
Figura 4.1. Laboratorio de energía solar, SENA.....	24
Figura 4.2. Diagrama de desarrollo experimental.....	25
Figura 4.3. . Módulo fotovoltaico CS6X-310P.....	26
Figura 4.4. Regulador de carga digital PPPT.....	27
Figura 4.5. Regulador de carga digital PWM. ....	27
Figura 4.6. Protección y cables usados. ....	28
Figura 4.7. Etiqueta Energética del refrigerador.....	29
Figura 4.8 . Refrigerador DC por compresión. ....	29
Figura 4.9. Medición de $T_i$ . ....	31
Figura 4.10. Color control.....	32
Figura 4.11. Datos adquiridos por el regulador de carga victron y el color control. Fuente. Victron energy.....	32
Figura 4.12. Equipos e instrumentos de medida usados en el experimento.....	34
Figura 4.13. Sistema de refrigeración con entradas y salida.....	35
Figura 4.14. Mapa conceptual de proceso experimental.....	36
Figura 4.15. Sistema usado para la determinación de las variables de entrada.....	38
Figura 4.16. Diagrama de flujo de metodología experimental del modelado.....	43
Figura 5.1. Variación del voltaje en el acumulador [V] vs tiempo [h], Con diferentes condiciones de $T_a$ y $C_r$ . ....	52
Figura 5.2. Variación del voltaje en el acumulador [V] vs tiempo [h]. Con diferentes condiciones de $T_{rp}$ .....	53
Figura 5.3. Potencia de consumo para diferentes SFV. ....	55
Figura 5.4. Gestión de carga en un SFVA mediante un regulador MPPT para días diferentes y no continuos. a) $T_{rp} = -10^{\circ}\text{C}$ . b) $T_{rp} = 3^{\circ}\text{C}$ . c) $T_{rp} = 8^{\circ}\text{C}$ . ....	56
Figura 5.5. Variación de la temperatura interna al transcurrir el tiempo. ....	57
Figura 5.6. Variación de la temperatura interna del refrigerador con apertura.....	58
Figura 5.7. Variación de la $T_i$ para diferentes casos.....	59
Figura 5.8. Variación de la la Energía $E_c$ respecto a $T_{rp}$ . ....	60

Figura 5.9. Dependencia de la Ec con Trp.....	61
Figura 5.10. Dependencia de Ec con tap.....	62
Figura 5.11. Dependencia de Ec con Cr.....	63
Figura 5.12. Dependencia de Ec con tap.....	66
Figura 5.13. Dependencia de Ec con tap.....	67
Figura 5.14. Dependencia de Ec con Cr y Trp.....	71

## Lista de acrónimos.

CC	Caracterización consumo (preliminar)	
CG	Caracterización generación (preliminar)	
Cr	Carga a refrigerar. ....	[L]
ee%	error relativo porcentual de la energía estimada por el modelo.	
ef%	error relativo porcentual de la energía del fabricante.	
Ec	Energía medida por el victron energy y el color control (patrón). ....	[Wh/día*]
EDC	Estado de carga. ....	[%]
Ee	Energía estimada por el modelado. ....	[Wh/día*]
Ef	Energía estimada del fabricante. ....	[Wh/día*]
FNCER	Fuentes no convencionales de energía renovable.	
Ia	Corriente en acumulador. ....	[A]
Ic	Corriente en carga. ....	[A]
Imp	Corriente nominal. ....	[A]
Ip	Corriente en panel. ....	[A]
Mr	Modelado refrigeración.	
nah	número de apertura por hora.	
nhp	número de horas por prueba.	
Pa	Potencia en acumulador. ....	[W]
Pc	Potencia en carga. ....	[W]
Pmp	Potencia nominal. ....	[W]
Pp	Potencia panel. ....	[W]
SFV	Sistema fotovoltaico.	

SFVA	Sistema fotovoltaico autónomo.	
SFVA DC	Sistema fotovoltaico autónomo con salida en corriente continua.	
ta	tiempo por apertura. ....	[min]
tap	tiempo de apertura por prueba. ....	[min]
Ta	Temperatura ambiente. ....	[°C]
Tc	Temperatura en carga. ....	[°C]
Ti	Temperatura interna en el refrigerador. ....	[°C]
Tref	Temperatura interna medida por el sensor del refrigerador. ....	[°C]
Trp	Temperatura de refrigeración programada. ....	[°C]
Va	Voltaje en acumulador. ....	[V]
Vc	Voltaje en carga. ....	[V]
Vmp	Voltaje nominal. ....	[V]
Vp	Voltaje en panel. ....	[V]

## **1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. ASPECTOS GENERALES.**

En el mundo aproximadamente el 81% de la energía consumida proviene de fuentes fósiles, mientras que el 19% restante proviene de fuentes renovables [1]. Las fuentes fósiles se asocian a diferentes factores tales como: la emisión de gases de efecto invernadero que aportan al calentamiento global, comprometiendo tanto la calidad como la continuidad de vida en el planeta [2], [4]; además, el carácter centralizado de estas fuentes que dificultan que la energía pueda llegar a regiones de difícil acceso y poblacionalmente dispersas [5], [6]; adicionalmente, se prevé un agotamiento de las fuentes fósiles a un mediano plazo [2]. Debido a los anteriores factores mencionados, en muchos países se ha generado la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, para garantizar la demanda energética a mediano y largo plazo, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Ahora bien, el total de la demanda en el país de recursos energéticos primarios corresponde a 78% de recursos fósiles y el 22% de recursos; para el caso de las fuentes fósiles, su carácter limitado se ve reflejado en los índices de reservas que pronostican suficiente carbón para los próximos 170 años, 7 años para el petróleo y 15 años para el gas natural [1]. Entre tanto, la matriz eléctrica, que produce aproximadamente un 17% de la energía final consumida en el país, cuenta con la amplia participación de la energía hidroeléctrica, que representa entre el 70% y 80% de la generación, según variaciones en la hidrología anual [1]. La alta dependencia de Colombia en sus recursos hidroeléctricos pone al país en riesgo periódico de escasez y altos precios de la energía, como fue evidenciado en la crisis energética generada por el fenómeno de “El Niño” en los años 1992, 1993 y 2016 o más recientemente en los altos precios de energía experimentados en 2009, 2010, 2013 [1] y 2016. Además, el carácter centralizado de estas fuentes provoca que en muchas regiones y comunidades del país no cuenten con el servicio público de energía eléctrica [7] debido a su alta dispersión y bajo consumo, lo que hace totalmente ineficiente, en términos económicos la extensión de las líneas del Sistema de Interconexión Nacional (SIN). Así mismo, el pronóstico de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en su ideario energético 2050, el país debería

prepararse para quintuplicar la capacidad instalada en los próximos cuarenta a cincuenta años [1]. Por tanto, si se tiene en cuenta lo escrito anteriormente, las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) jugarían un papel fundamental en la diversificación en la canasta energética, fundamentada en la disponibilidad de recursos, la progresiva reducción de costos de inversión asociados a su aprovechamiento y la evolución en términos de rendimiento [1] impulsando el desarrollo del país.

Para aprovechar esta oportunidad que brinda las FNCER el gobierno Colombiano desde hace unos años viene proponiendo metas como: el pasar de una participación de 3,5% de FNCER en términos de capacidad instalada del SIN para el años 2015, e incrementar dicha participación al 6,5% para el año 2020; además, para las Zonas No Interconectadas (ZNI), se va a aumentar la participación de 20% y 30% de FNCER en las capacidades de generación allí instaladas para los años 2015 y 2020, respectivamente. [1] También, para apalancar y cumplir estas metas se ha creado los fondos donde se impulsan proyectos enfocados en la utilización de estas fuentes como: el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales (FAER) y Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas No Interconectadas (FAZNI) [9]. Por último, normativamente estas fuentes de energías están acogidas por los proyectos de ley 096 de 2012 de la Cámara de Representantes y 278 de 2013 del Senado de la República, las cuales culminaron con la expedición de la Ley 1715 de 2014 por medio de la cual “se regula la integración de las energías renovables no convencionales al SIN” [1]

Las FNCER, en particular la energía solar, enfocada a los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFVA), están considerados como una tecnología en proceso de maduración y una opción de gran utilidad para dar acceso de electricidad a miles de personas que viven en ZNI [2], [3], así mismo porque en parte los costos de producción y los precios de la tecnología SFVA han decrecido de manera considerable en los últimos 10 años y más en los últimos 4 años [1].

Aun así, faltan aspectos por mejorar por ejemplo en la parte técnica, se observa que la falta de un adecuado dimensionamiento afecta la fiabilidad, es decir, generando pérdidas prematuras de capacidad de generación, de esta manera afectando la economía y el confort del usuario [3]. El nivel de confiabilidad de un SFV instalado depende directamente de 2 factores: el primero es la latitud del sitio donde se hace la instalación, debido a que está directamente relacionado con la cantidad de radiación que le llega al panel FV por día. Y el segundo es la

cantidad de energía diaria demanda por la carga (televisor, computador, luminaria, radio, refrigerador) que va a ser electrificada. Con base en estos 2 factores se hace adecuado dimensionamiento del SFV con el fin de implementar un diseño en términos de cuál debe ser el tamaño de generador y batería para satisfacer cierta demanda energética minimizando el costo. Para llegar a este diseño, la mayoría de estudios se han basado en el primer factor, es decir, en modelar el recorrido aparente del sol respecto a la tierra, cálculos de parámetros como la irradiación diaria sobre el plano del panel fotovoltaico, en mejorar los modelados de los materiales de conversión (generación) de energía, etc. Pero no se ha dado la importancia al segundo factor, lo que es un error porque los cálculos enfocados en el primer factor se vendrían al piso si ni siquiera se sabe cuánto energía “consume” la carga y la forma de consumo de los usuarios, por tanto, el segundo factor es importante, debido a que esta energía es la energía diaria mínima que tiene que generar el SFV.

La dificultad de hallar la energía real de consumo impera en el hecho de que producir en masa los equipos electrodomésticos (la carga en el SFV) permite vender los equipos más económicos, pero llevan a definir sistemas estándar que responden, por tanto, a unas necesidades también estandarizadas. Pero, obviamente, el panorama de los usuarios que van a utilizar esa aplicación no es rígido ni establecido, sino que varía mucho de unos a otros. [5], [1] Debido a esta dificultad, para hallar el tamaño del SFV entonces, es elegido un margen o factor de protección que es criterio del diseñador debido a su experiencia, este margen “asegura” que la energía producida durante el período de diseño, exceda la demanda de la carga [6]. Esto representa un problema no sólo para la industria fotovoltaica, sino para la credibilidad general del sector fotovoltaico. Por eso, para un correcto análisis se debe considerar los perfiles de consumo del usuario con el fin de brindar un mejor diseño.

En diferentes aplicaciones se utilizan equipos (cargas) donde el consumo energético depende de la aplicación que se le vaya a dar, como los sistemas de bombeo de agua, donde la energía de consumo depende de la profundidad del pozo y el caudal. De igual forma en el caso de los sistemas de refrigeración, debido a que el fabricante no tiene en cuenta condiciones de uso y por lo general no tiene presente las condiciones ambientales para hallar el dato de consumo energético que entregan en la ficha técnica. Se ha demostrado que diferentes factores de uso como apertura de la puerta del refrigerador, el incremento de carga dentro del refrigerador o la temperatura ambiente, aumenta el consumo energético. Entregar un dato de consumo energético omitiendo la influencia de estos parámetros, es un inconveniente para los

diseñadores de SFV que van realizar una aplicación con un sistema de refrigeración, debido que un dimensionamiento con esta información del fabricante conduce a dimensionamientos erróneos reflejados en sobredimensionamientos, proporcionando un sobre-costo en el sistema o un sub-dimensionamiento, ocasionando que la demanda energética por el refrigerador no sea satisfecha, dejando caer el sistema, de esta manera afectando la fiabilidad de los mismos.

Este trabajo de investigación busca aportar a la solución de este problema. Mediante la caracterización de un refrigerador DC por compresión, horizontal y con una capacidad de 240L alimentado por un SFV DC. Donde se realizaron pruebas experimentales con la finalidad de determinar el comportamiento del refrigerador bajo ciertas condiciones de uso y así hallar una ecuación matemática que permita predecir su consumo energético, el cual sirve de base para realizar un buen dimensionamiento y así garantizar su fiabilidad.

En últimas el resultado obtenido en este proyecto aporta al dimensionamiento del SFV teniendo como carga un refrigerador DC, lo que permite la implementación de esta tecnología en sitios donde tengan la necesidad de conservar productos alimenticios especialmente en las zonas aisladas que no cuenta con el tendido eléctrico. En este sentido el departamento del Cauca ya que cuenta con una economía basada en la agropecuaria, por ejemplo, el sector lácteo y pesquero, se puede realizar proyectos productivos que potencialicen la producción brindando a los pequeños productores estos sistemas que le permitan conservar los alimentos dando una solución técnica, ambiental y económica.

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1. Objetivo General.**

- Mejorar el diseño de un sistema fotovoltaico para la electrificación de un refrigerador de 0.24 m<sup>3</sup> DC, aprovechable en las cadenas productivas láctea y pesquera en el departamento del Cauca.

### **1.2.2. Objetivos Específicos.**

- Caracterizar experimentalmente el comportamiento del sistema energético del refrigerador DC teniendo en cuenta los parámetros:  $t_a$ ,  $T_{rp}$  y  $Cr$ .
- Modelar experimentalmente el sistema que describa el comportamiento energético del sistema de refrigeración DC electrificado por paneles fotovoltaicos.

- Validar el diseño del SFV mediante pruebas en funcionamiento real.

#### **1.4 CONTRIBUCIONES.**

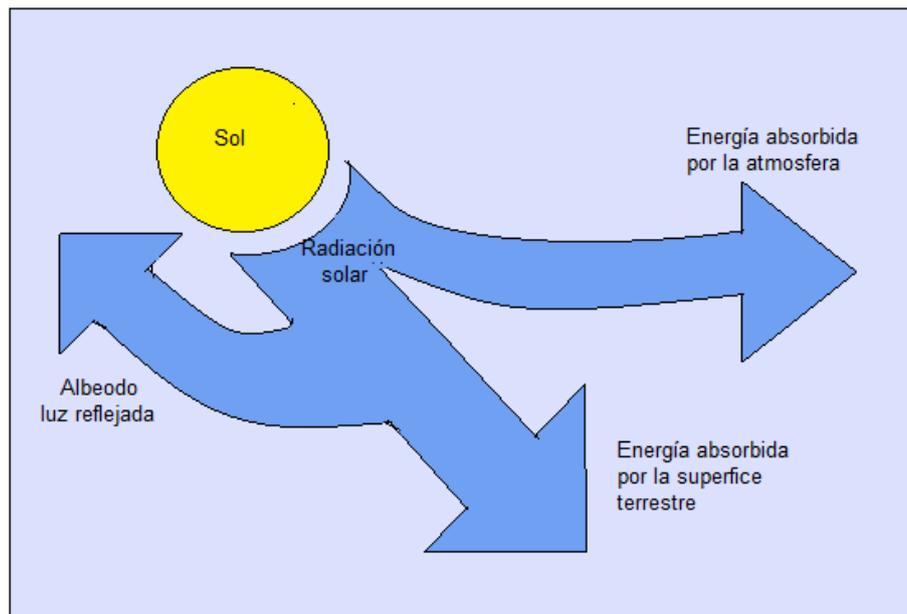
Este trabajo contribuye a dos sectores: el sector fotovoltaico y al sector productivo, tanto agropecuario como acuícola, los cuales necesitan mantener cadena de frío para la conservación adecuada de sus productos. Primero, al desarrollar una herramienta matemática, que permita determinar el valor de energía del refrigerador para diferentes aplicaciones y en diferentes condiciones ambientales, crea un beneficio importante para la ejecución de SFVA, ya que permite realizar diseños más fiables aumentando la credibilidad del sector fotovoltaico, justificada por un lado, en que la carga siempre va a estar electrificada y los alimentos no van a perder sus condiciones ideales de conservación y por otro lado, en que, al no sobredimensionar los SFV no se va a entrar en sobre costos, siendo más viables económicamente para los usuarios. Además, con este trabajo se deja entre ver, que faltan estudios que permitan determinar datos fiables de energía por el fabricante. Esta herramienta puede usarse por los fabricantes de refrigeradores, para que puedan proporcionar dentro de su ficha técnica una tabla de consumo energético que corresponda con la práctica, donde se tenga en cuenta más factores y por tanto un dato de energía más preciso. Por último, a los sectores productivos, al implementarse SFVA con refrigerador DC en sus unidades productivas, les permiten mantener la cadena de frío manteniendo la calidad de sus productos y conservarlos por más tiempo, además de la posibilidad de diversificar los alimentos transformándolos en productos derivados, de esta manera viabilizando la obtención de una venta más benéfica para el productor y así tener mayores ingresos económicos.

## 2. DISPOSITIVOS USADOS EN UNA INSTALACIÓN DE UN REFRIGERADOR DC ELECTRIFICADO POR UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DC AUTÓNOMO.

### 2.1 ASPECTOS GENERALES.

#### 2.1.1. La radiación solar.

La energía, que de forma continua irradia el sol, está compuesta por ondas electromagnéticas de longitudes onda en las zonas ultravioleta, visible e infrarroja del espectro. No toda esta considerable cantidad de energía alcanza la superficie de la Tierra, sino que se distribuye por la acción de diferentes mecanismos que se han dibujado esquemáticamente en la figura 2.1. La atmosfera refleja cerca del 20% y absorbe aproximadamente un 30% de la radiación solar, mientras que solo un 50% llega a la superficie terrestre.



**Figura 2.1. Radiación solar que incide en la tierra. Fuente propia**

Para las aplicaciones solares, especialmente las fotovoltaicas, es interesante conocer qué cantidades de energía hay contenidas en el espectro solar por encima o por debajo de una determinada longitud de onda. Las energías de los fotones se miden convencionalmente en eV (electrón-voltio). Entre las longitudes de onda ( $\lambda$ ) y la energía de los fotones existe la relación: [9]

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (2.1.)$$

Donde:

E = energía [eV]

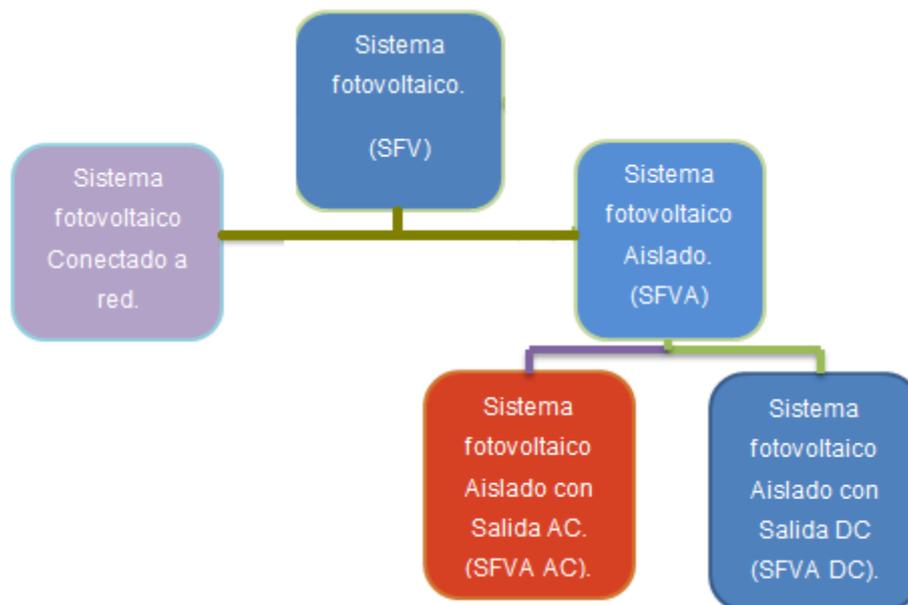
h = constante de Planck ( $h \approx 6.626069 \times 10^{-34}$  J-s).

c = velocidad de la luz ( $c = 299,792,458$  m/s).

$\lambda$  = longitud de onda [ $\mu m$ ]

### 2.1.2. Sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos a grandes rasgos se pueden clasificar como se muestra en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Diagrama jerárquico de tipos de sistemas fotovoltaicos.**

### 2.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO DC (SFVA DC).

Un sistema fotovoltaico autónomo con salida de corriente directa (DC), consta de varios elementos que permiten funcionar adecuadamente para abastecer una demanda energética producida por cargas (televisor, luminaria, refrigerador, etc.) de corriente directa.

Los elementos son:

El generador fotovoltaico (1). El banco de acumuladores (2) y el regulador o controlador de carga (3), además del cableado, las protecciones y la estructura que soporta el SFVA. La carga dc para este proyecto es un refrigerador dc (4). La figura 2.3 presenta mediante símbolos de cada elemento y como va conectado un SFVA con salida DC.

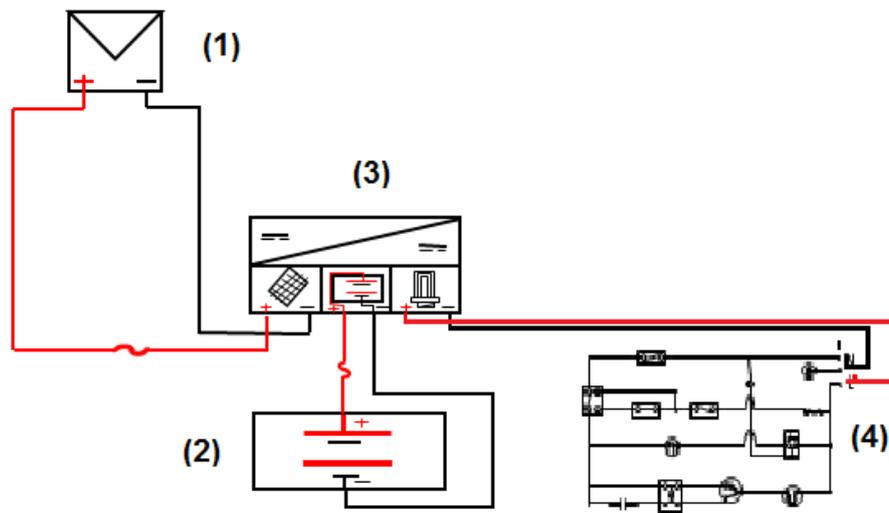


Figura 2.3. Esquema del sistema fotovoltaico con salida DC.

### 2.2.1. Generador fotovoltaico.

- **La célula solar y el efecto fotovoltaico.**

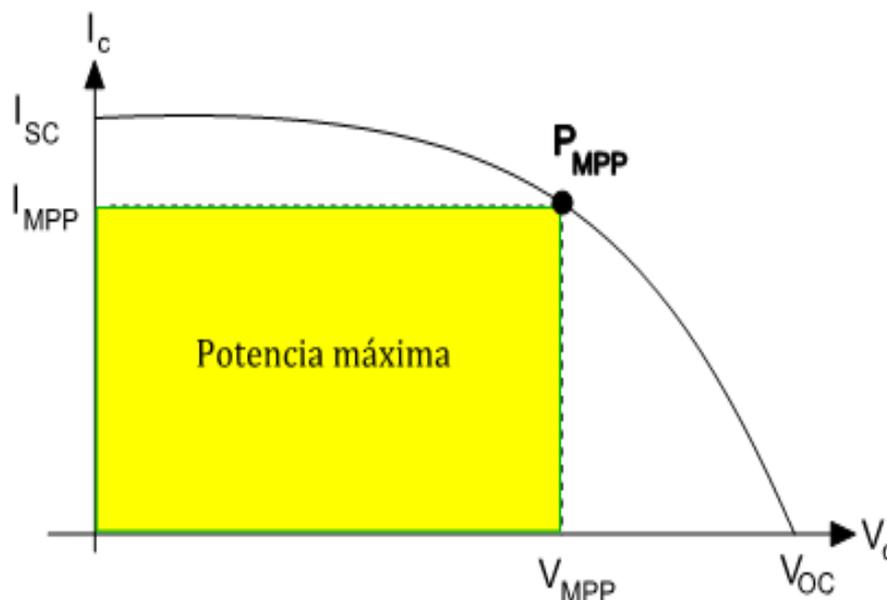
La célula solar es un dispositivo semiconductor. De acuerdo con la forma de la estructura de los átomos, las células fotovoltaicas se pueden clasificar en: Cristalinas y amorfas. Dentro de las cristalinas están las monocristalinas y las policristalinas. Las células fotovoltaicas más usadas son las cristalinas.

Bajo ciertas condiciones, cuando la radiación electromagnética es la solar y el material considerado es un semiconductor como el Silicio (Si), parte de la energía es absorbida creando pares de carga, electrones ( $e^-$ ) y huecos ( $h^+$ ) que una vez producidos se mueven en el volumen del sólido. Con el campo eléctrico interno creado debido a un contacto entre un

semiconductor tipo n con otro tipo p, es decir, una unión p-n, las cargas positivas y negativas serán separadas por él. Esta separación conduce a una diferencia de potencial entre dos zonas del material que, si son conectadas entre sí mediante un circuito externo al tiempo que la radiación electromagnética incide en el material, darán origen a una corriente eléctrica que recorrerá el circuito externo. El fenómeno descrito se llama efecto fotoeléctrico y se descubrió por Becquerel en 1839.

- **Curva característica de la célula fotovoltaica.**

La representación estándar de una célula fotovoltaica es la característica corriente-tensión, figura 2.4. La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El punto en concreto de corriente y voltaje en el que la célula fotovoltaica trabajará vendrá determinado por la carga a la que esté conectado.



**Figura 2.4. Curva I-V en una célula Fotovoltaica.**

- **Principales parámetros de la característica I-V.**

Bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura se pueden obtener los siguientes valores:

Los valores de corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) son la máxima corriente y el máximo voltaje que producirá el dispositivo bajo esas condiciones.

La potencia máxima ( $P_{MPP}$ ) es la máxima potencia, por tanto la corriente en el punto máximo de potencia ( $I_{mpp}$ ) y el voltaje en el punto máximo de potencia ( $V_{mpp}$ ), son los valores para  $P_{MPP}$ , bajo esas condiciones.

Factor de forma (FF). Es el valor correspondiente al cociente de  $P_{MPP}$  y el de  $I_{sc} \times V_{oc}$ . Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1 siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil cuadrado, no real. Nos da una idea de la calidad de la célula fotovoltaica.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.2)$$

Los valores que se indican en la curva I-V se obtienen sometiendo el modulo fotovoltaico a unas condiciones específicas, denominadas condiciones estándar de medida (CEM).

Las CEM, quedan definidas por los siguientes valores:

Irradiación:  $1000 \text{ W/m}^2$ , Temperatura:  $25^\circ\text{C}$ , Incidencia normal, Espectro radiante o de aire: AM 1,5 y Velocidad del viento:  $1 \text{ m/s}$ .

- **Modulo Fotovoltaico**

Para su empleo práctico, las células solares pueden ser asociadas eléctricamente en diferentes combinaciones serie o paralelo, que permiten obtener los valores de tensión y corriente necesarios para una aplicación determinada y se encapsulan entre materiales que las protegen de los efectos de la intemperie. El conjunto de células, conexiones, protecciones, soportes, etc., constituye lo que es llamado el modulo fotovoltaico, que es el elemento que se comercializa para instalar. De la misma manera los módulos fotovoltaicos se pueden asociar eléctricamente en diferentes combinaciones serie o paralelo, que permitan tener valores de tensión y corriente para una aplicación determinada, a las diferentes configuraciones entre módulos fotovoltaicos se denomina campo o arreglo fotovoltaico.

Conexión en serie. Los módulos fotovoltaicos se conectan en serie para obtener valores de voltaje de salida  $V_0$  mayores.

$$V_0 = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.3)$$

Conexión en paralelo. Los módulos fotovoltaicos se conectan en paralelo para aumentar la corriente de salida  $I_0$ . En paralelo el voltaje es el mismo que el de uno solo, pero la salida de corriente  $I_0$  es la suma de las corrientes de cada módulo conectada en paralelo.

$$I_0 = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.4)$$

Para obtener la máxima eficiencia por el modulo fotovoltaico se debe poner el modulo perpendicular a los rayos solares. Para sistemas fijos, como el sol varia a lo largo del año, el día y la hora se pone el modulo en una posición óptima.

Para Colombia, como está ubicado cerca de la línea ecuatorial los rayos solares durante todo el año llegan casi perpendiculares, por tanto los módulos deben tener una inclinación de un ángulo respecto a la superficie terrestre aproximadamente de  $2,5^\circ$  y considerando un factor de auto limpieza se recomienda una inclinación entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ . Los módulos fotovoltaicos se ubican mirando al sur, debido a que se está en el hemisferio norte.

### **2.2.2. Acumulador.**

Los acumuladores almacenan energía eléctrica y son los encargados de abastecer de energía a la carga cuando no hay generación fotovoltaica como en la noche o la generación de energía fotovoltaica no alcanza a abastecer la demanda energética, por ejemplo en los días con bastante nubosidad, ubicación geográfica, etc.

Son tres las funciones principales que desempeñan los acumuladores en un SFVA.

1. Almacenar energía eléctrica en periodos de abundante radiación solar y/o bajo consumo de energía eléctrica.
2. Proveen energía eléctrica necesaria en periodos de baja o nula radiación solar.
3. Estabilización del voltaje. Actúan como reguladores evitando fluctuaciones dañinas para las cargas o los consumos.

- **Características técnicas de los acumuladores.**

Están hechas para trabajar con ciclos de carga/descarga lentos, esto les permite proveer de energía durante muchas horas corrientes eléctricas moderadas.

**La capacidad del acumulador** se mide en amperio-hora (Ah), una medida comparativa de la capacidad de un acumulador para producir corriente. Dado que la cantidad de energía que un acumulador puede entregar depende de la razón de descarga del mismo, los Ah deben ser especificados para una tasa de descarga. La tasa de descarga más frecuente es 100 horas (C-100).

**Capacidad nominal.** Capacidad de energía asignada por el fabricante a un acumulador nuevo y bajo determinadas condiciones de operación.

**Estado de carga (EDC).** Capacidad disponible de un acumulador expresado como un porcentaje de la capacidad nominal.

En la mayoría de las instalaciones, dependiendo de la capacidad de energía y el voltaje de la instalación, será necesario asociar varios acumuladores en serie o paralelo para obtener los niveles deseados de voltaje y corriente, a esta combinación se le denomina arreglo de acumuladores.

Se conectan en serie para lograr aumentar el voltaje y mantener el mismo valor de capacidad. El voltaje generado es igual a la suma de todos los voltajes por cada acumulador.

Se conectan en paralelo para lograr aumentar la capacidad y mantener el mismo valor de voltaje. La capacidad será igual a la suma de todas las capacidades de cada acumulador.

- **Tecnologías de acumuladores.**

Acumulador de plomo ácido. Son muy usados en SFVA debido a su alto número de ciclos de vida y bajo costo, pero tienen una baja densidad de energía, requieren mantenimiento, etc.

Acumuladores estacionarios. Son los más adecuados para los usos fotovoltaicos debido a su larga vida y su excepcional capacidad de funcionamiento en regímenes de carga y descarga lenta.

Acumulador de GEL. También son estacionarias. En estas el electrolito está gelificado, de modo que no precisan de mantenimiento y pueden funcionar colocadas en cualquier posición.

### **2.2.3. Regulador o controlador de carga.**

El regulador es el encargado de controlar los procesos de carga y descarga del acumulador. Las principales funciones son:

- Evita sobrecargas en el acumulador. Que una vez cargado (EDC = 100%) no continúe cargando el acumulador. Esto aumenta la vida útil del acumulador.
- Impide la sobre descarga del acumulador en los periodos de luz solar insuficiente. Cuando una vez el acumulador esté descargado no continúe suministrando corriente a la carga; en consecuencia aumenta la vida útil del acumulador.
- Asegura el funcionamiento del sistema en el punto máximo de eficiencia.

- **Tecnologías de reguladores de carga.**

Existen dos tecnologías, los PWM y los MPPT.

**PWM.** El regulador PWM es, en esencia, un interruptor que conecta los paneles solares a la batería. El resultado es que la tensión de dichos paneles descenderá a valores cercanos de la tensión de la batería.

**MPPT.** El regulador MPPT es más sofisticado (y más caro): Un regulador de punto máximo de potencia o MPPT (por sus siglas en inglés) dispone, además del diodo de protección, un convertidor de tensión DC-DC y de un seguidor del punto de máxima potencia, esto le permite convertir altas tensión en el módulo fotovoltaico a bajas tensiones en el acumulador y

permite trabajar a tensiones diferentes en el módulo fotovoltaico y en las baterías; el seguidor del punto de máxima potencia adapta la tensión de funcionamiento en el campo fotovoltaico a la que proporcione la máxima potencia, por tanto, en un regulador MPPT la energía que entra y sale del regulador es la misma, pero la tensión y la corriente son diferentes a un lado y a otro, con ello se consigue aumentar la tensión del panel solar y aumentar la producción de energía solar. [10]

## **2.3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.**

- **Refrigeración o proceso de enfriamiento.**

La refrigeración se define como la remoción de calor de una sustancia para llevarla o mantenerla a una temperatura convenientemente baja, respecto a la temperatura de los alrededores. El método de refrigeración más usado es el conocido como el sistema de refrigeración por compresión de vapor.

**Transferencia de Calor.** Es el estudio de la manera como fluye el calor y de los procedimientos para calcular el régimen de transferencia de calor, lo cual es de vital importancia en la refrigeración. La transferencia de calor puede tener lugar de tres maneras posibles: i) transferencia por conducción, ii) transferencia por convección y iii) transferencia por radiación.

### **2.3.1. Los componentes principales de un sistema de refrigeración.**

**Compresor.** Aumenta la presión de evaporación, hasta la presión a la cual el gas puede ser condensado.

**Evaporador.** En él se alcanza el objetivo de la remoción de calor del medio que se desea enfriar.

**Condensadores.** Es un cambiador de calor. Donde se remueve el calor del vapor refrigerante que sale del compresor, de manera que el refrigerante se condense a su estado líquido.

**Dispositivos de control de flujo (de expansión) del refrigerante.** Este dispositivo es el encargado de regular el flujo del refrigerante líquido que se alimenta al evaporador y de crear una presión desde el lado de alta hasta el lado de baja del sistema.

**Refrigerantes.** Cualquier fluido al que se le puede hacer cambiar de estado, de un líquido a gas, puede servir como refrigerante.

### 2.3.2. El sistema de refrigeración por compresión de vapor.

**Proceso A-B, a través del dispositivo de control de flujo.**

En A el refrigerante está en estado líquido a una temperatura alta y presión alta. Cuando pasa por la válvula de expansión el refrigerante pierde presión, así llegando al punto de evaporización, una pequeña porción del refrigerante ebulle, utilizando calor del refrigerante. De esta manera se logra que la mayor parte del refrigerante que se encuentra en estado líquido se enfríe. En el punto B el refrigerante sale de la válvula en una mezcla de líquido y gas evaporado en estado saturado.

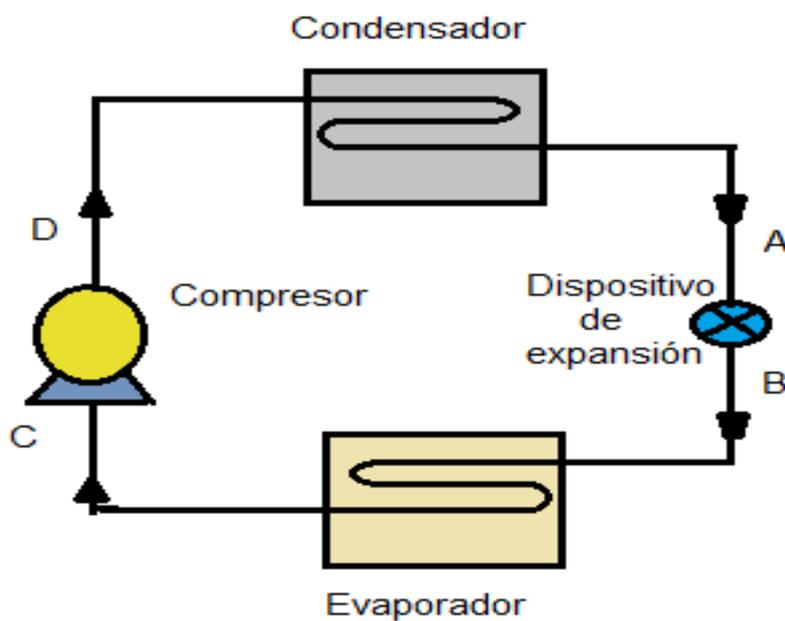


Figura 2.5. Sistema básico de refrigeración por compresión de vapor.

### **El proceso B-C, a través del evaporador.**

La sustancia que se debe enfriar (en este caso agua o aire) cede calor al refrigerante que está a una temperatura más baja, logrando así la refrigeración. En el punto C el gas sale como vapor saturado o sobrecalentado.

### **El proceso C-D, a través del compresor.**

El compresor comprime el vapor a una presión elevada. En D, el refrigerante tiene una presión elevada debido al trabajo del compresor (motor). Presión un poco mayor como inició el proceso, es decir, como entró a la válvula de expansión.

### **El proceso D-A, a través del condensador.**

En este punto el vapor cede calor al aire que está más frío por tanto el refrigerante se condensa. El refrigerante llega a A en el estado líquido.

### **2.3.3. Ciclo termodinámico de refrigeración y funcionamiento del sistema.**

Es importante determinar el comportamiento de un sistema de refrigeración. Entre las diferentes características esenciales del funcionamiento se encuentran la capacidad de enfriamiento (refrigeración), potencia requerida por el compresor, flujo de refrigerante y cantidad de calor rechazado (removido) en el condensador.

Un ciclo termodinámico está representado por la serie completa de procesos y cambios físicos que experimenta el refrigerante en el sistema.

**El efecto de refrigeración ( $q_e$ ).** Representa asimismo la cantidad de calor removido del medio que se debe enfriar por cada libra o kilogramo de refrigerante que fluye.

**Capacidad del sistema ( $Q_e$ ).** La capacidad de cualquier sistema de refrigeración es la velocidad a la cual se puede efectuar la eliminación de calor del espacio refrigerado. Esta, tradicionalmente se ha expresado en Btu por hora. Está expresada por:

**Flujo másico del refrigerante ( $m$ ).** El flujo másico circula a través de un sistema con el fin de producir una capacidad dada de refrigeración.

**Calor de rechazo (cr).** El calor de rechazo se define como la cantidad de calor removido por libra de refrigerante, en el condensador.

**El coeficiente de rendimiento.** Resulta conveniente poseer una sola medición que describa con cuánta efectividad opera un equipo de refrigeración. El coeficiente de rendimiento (CDR) cumple este objetivo. Se le define como:

$$COP = \frac{\text{capacidad de refrigeración } (Q_p)}{\text{suministro de potencia } (P)} \quad (2.5)$$

El COP proporciona una medición de la utilización eficiente de la energía del sistema. Debido a que siempre se desea obtener la mayor capacidad de refrigeración con el menor gasto de energía, es conveniente contar con el mayor valor práctico de COP. Tanto el  $Q_p$  como el  $P$  tienen que tener las mismas unidades.

#### **2.3.4. La carga de refrigeración.**

La carga de refrigeración es la cantidad de remoción de calor del espacio refrigerado, que se requiere para mantener el espacio o el producto a las condiciones deseadas.

La carga es el resultado de las ganancias de calor a partir de varias fuentes, las que es posible clasificar convenientemente según las siguientes categorías.

**Transmisión de calor debido a las paredes, pisos y cielo raso.** Es el resultado de la conducción y la convección a través de las superficies circundantes como consecuencia de la diferencia de la temperatura.

**Infiltración del aire.** Cada vez que se abren la puerta del refrigerado, tiene lugar la infiltración de aire desde el exterior. La entalpía del aire que se infiltra y la de espacio representa una carga de calor que es preciso de remover mediante el equipo de refrigeración.

**Carga de enfriamiento del producto.** Los productos que se refrigera se vuelven parte de la carga de refrigeración debido a dos efectos. Primero, es preciso remover calor del producto para llevarlo a las condiciones de almacenamiento. Esto se llama carga de enfriamiento.

Segundo, algunos productos (las frutas las verduras) continúan emitiendo calor en condiciones de almacenamiento.

Si el producto se enfría a una temperatura por encima del punto de congelación, la carga se halla:

$$Q = m \times c_1 \times TC_1 \quad (2.6)$$

Donde:

$Q$  = cantidad de calor removida del producto, Btu por 24 h.

$m$  = cantidad del producto enfriado lb/24 h.

$c_1$  = calor específico del producto, por encima del punto de congelación, Btu/lb- °F.

$TC_1$  = cambio de la temperatura del producto por encima de la congelación, de la temperatura inicial a la temperatura final, °F.

Si se va a congelar el producto, entonces la carga también se compone por el calor latente de fusión y el calor sensible de enfriamiento del producto congelado por debajo de la temperatura de congelación.

La remoción del calor latente para congelar el producto se determina a partir de la siguiente ecuación: [11]

$$Q = m \times h_{if} \quad (2.7)$$

En donde  $Q$  y  $m$  tiene el mismo significado que la anterior ecuación y  $h_{if}$  es el calor latente de fusión del producto, Btu/lb.

Para hallar la remoción del calor sensible al enfriar el producto después de que éste es congelado hasta la temperatura de almacenamiento, se utiliza:

$$Q = m \times c_2 \times TC_2 \quad (2.8)$$

Donde:

Q y m tiene el mismo significado que en la ecuación (2.6)

$C_2$  = calor específico del producto por debajo del punto de congelación, Btu/lb-°F.

$TC_2$  = cambio de la temperatura del producto, desde el punto de congelación hasta la temperatura, °F.

#### 2.4. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.

La regresión lineal general se basa en el principio estadístico de mínimos cuadrados, el cual se utiliza para hallar una función que se ajusta a datos experimentales de la forma:

$$Y = \beta_0 z_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \cdots + \beta_k z_k + e \quad (2.9)$$

Donde  $Y$  es la variable dependiente de naturaleza aleatoria,  $z_0, z_1, \dots, z_{k+1}$  son  $k+1$  funciones diferentes de naturaleza determinística,  $e$  es una variable aleatoria que representa los valores que no se han tomado en cuenta. Observe que la terminología “lineal” se refiere sólo a la dependencia del modelo sobre sus parámetros (es decir las  $\beta$ ) [11]

En forma particular la ecuación 2.9 se puede escribir como una regresión lineal múltiple:

Reemplazando  $z_0 = 1$ ,  $z_1 = x_1$ ,  $z_2 = x_2$  y  $z_k = x_k$

$$Y = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + e \quad (2.10)$$

Donde:

$x_1, x_2$  y  $x_k$  son variables independientes conocidas y de naturaleza determinística,  $Y$  es la variable dependiente de naturaleza aleatoria y  $e$  es una variable aleatoria que representa los valores que no se han tomado en cuenta.

### 3. DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTONOMO DC.

Primero que todo es válido aclarar que hay varios tipos de metodologías para diseñar sistemas de este tipo, debido a que todavía no hay una estandarización. Hay metodologías que son más precisas porque son más detalladas y otras metodologías, que aunque no son tan detalladas, para efectos prácticos son aplicables. La siguiente metodología denominada “dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo para el mes más desfavorable” [13] fue la que se empleó para realizar el dimensionamiento y diseño del SFVA. Para un mejor entendimiento se va a explicar la metodología con un ejemplo, donde se va utilizar los datos que entrega el fabricante del refrigerador utilizado en este proyecto. Anexo A.1

#### I. Dimensionamiento para un caso particular, ejemplo 1.

Se desea implementar un SFVA DC para refrigerar leche en la ciudad de Popayán, teniendo en cuenta que la temperatura ambiente máxima promedio, bajo sombra en el mes de agosto es 25°C y que la leche se refrigera a una temperatura de 3°C. El fabricante para estas condiciones nos indica en la ficha técnica que el refrigerador consume 125 Wh por día\*.

#### 3.1. CONSUMO ENERGÉTICO.

El primer paso es hallar el consumo de energía diario por la carga DC. Como se indicó en la tabla del fabricante el consumo de energía es 125 Wh por día\*.

Al dato de consumo por de energía por día se aplica un factor de seguridad que tiene presente la irradiación promedio del peor mes para Popayán ya que esta está entre 3 y 4,5 KWh/m<sup>2</sup>. Para la ciudad de Popayán se sobredimensiona un 30% por ende la energía quedaría [13]:

$$E' = E \times 1,3 = 125 \left[ \frac{Wh}{día*} \right] \times 1,3 = 162,5 \frac{Wh}{día*} \quad (3.1)$$

### 3.2. ACUMULADOR.

El segundo paso es hallar el acumulador a utilizar. Se tiene presente que comercialmente los voltajes nominales de los acumuladores cambian. Para mantener un valor bajo de corriente en el sistema, por criterio personal se utiliza un acumulador de 24V. La acumulación está dada por:

$$C = \frac{E_r}{24V} = \frac{162,5 Wh}{24V} = 6,771 Ah \quad (3.2)$$

Considerando la carga-descarga profunda del acumulador, para darle un mejor funcionamiento y aumentar la vida útil. Sabiendo que la descarga no debe exceder el 30% de su capacidad se divide entre 0.7= P<sub>c-d</sub>. Además, según los días de autonomía la capacidad del acumulador queda terminada por:

$$C_T = \frac{C [Ah] \times (N_D)}{P_{c-d}} = \frac{6,771 \times 2}{0,7} = 19,34 Ah \quad (3.3)$$

$N_D$  = días de autonomía,  $N_D = 2,3,4,\dots,m$

Por tanto el acumulador o el arreglo de acumuladores deben ser de 24V y 19,34 Ah.

### 3.3. REGULADOR DE CARGA, CABLEADO Y PROTECCIÓN.

El tercer paso es hallar el regulador de carga. Primero se halla la corriente máxima que se necesita para satisfacer el sistema y para eso toca tener presente las horas de sol  $H_s$ . En la ciudad de Popayán está entre 4 y 5 [14], depende del mes. Como se dimensiona para el peor mes, se toma  $H_s = 4$  h, entonces:

$$I = \frac{C_T}{4h} = \frac{19,34 Ah}{4h} = 4,83 A \quad (3.4)$$

La selección del cable, de las protecciones debe ser de tal forma que soporte la corriente  $I$ . Para proteger los dispositivos para picos de corriente se multiplican por un factor. Entonces:

$$I_T = I \times 1,1 = 4,83 A \times 1,1 = 5,32 A \quad (3.5)$$

El regulador de carga se debe escoger con una corriente de 5,32 A a 24 V.

La selección del cable se debe escoger para que soporte corriente hasta de 5,32 A al igual que las protecciones.

### 3.4. ARREGLO FOTOVOLTAICO.

Paso 4. Hallar la capacidad del arreglo fotovoltaico, se multiplica la corriente  $I_T$  por el  $V_{mp}$  del módulo fotovoltaico. Para un módulo de 24V el  $V_{mp} \approx 33,8 V$ .

$$P = 4,83 A \times 33,8 V = 163,254 W \quad (3.6)$$

Donde  $P$  es la potencia que tiene que suministrar el arreglo fotovoltaico para que pueda abastecer el refrigerador bajo esas condiciones de uso y con 1 día de autonomía.

Para comparar la energía consumida por un mismo refrigerador cómo afecta el dimensionamiento de un SFV se va a exponer un segundo caso, utilizando el mismo método de dimensionamiento el cual se deja constante el número de horas que funciona el refrigerador, los factores de protección y el voltaje de la batería. Cambiando el producto a refrigerar, por lo tanto la  $Trp$ .

#### II. Dimensionamiento para un caso particular, ejemplo 2.

Se desea implementar un SFVA DC para refrigerar pescado en la ciudad de Popayán, teniendo en cuenta que la temperatura ambiente máxima promedio, bajo sombra en el mes de agosto es  $25^{\circ}C$  y que el pescado se refrigera a una temperatura de  $-10^{\circ}C$ . El fabricante para estas condiciones nos indica en la ficha técnica que el refrigerador consume 311 Wh por día\*.

Para esas condiciones y teniendo en cuenta iguales consideraciones, es decir, acumulador de 24 V, modulo fotovoltaico de 24 V,  $H_s = 4h$  e iguales factores de protección para cada uno de los pasos. Los resultados de los dimensionamientos y sus diferencias se muestran en la siguiente tabla.

En estos dos casos se utilizaron los mismos equipos y las mismas consideraciones de generación. La diferencia recae en que se tomaron dos valores de consumo energía ofrecidos por el fabricante 125Wh/día\* y 311Wh/día\* para el primer caso y el segundo caso respectivamente. Este hecho evidencia que para realizar un dimensionamiento de SFVA (SFV) el único recurso con el que cuenta el diseñador para saber la energía que consume el equipo a electrificar, es la etiqueta energética del fabricante.

Caso 1. Refrigerador leche a 3°C y $T_a=25^\circ\text{C}$	
Componentes	Calculo
Arreglo FV	33,8 Vmp, 163,3 Wp
Regulador	24 V, 5,3 A
Acumulador	19,3 A-h, 24 V
Protección	5,32 A
Cableado	5,32 A

**Tabla 3.1. Componentes del SFVA.**

Caso 2. Refrigerar pescado a $-10^\circ\text{C}$ y $T_a = 25^\circ\text{C}$	
Componentes	Calculo
Arreglo FV	33,8 Vmp 406,6 Wp
Regulador	24 V 13,2 A
Acumulador	24 V 48,13 A-h
Protección	13,2 A
Cableado	13,2 A

**Tabla 3.2. Componentes de SVA calculados.**

#### 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Este trabajo de investigación fue realizado en el laboratorio de energía solar del Centro de Teleinformática y Producción Industrial (CTPI), SENA regional Cauca, ubicada en la ciudad de Popayán.



**Figura 4.1. Laboratorio de energía solar, SENA.**

El desarrollo experimental de este proyecto se dividió en dos etapas principales. La primera etapa se basó en realizar un estudio preliminar del comportamiento energético del refrigerador, determinando la relación de variables que afecten el consumo de energía y a su vez verificando el adecuado funcionamiento de los equipos. Así mismo, ésta primera etapa se divide en dos; la primera estudia el comportamiento energético de la parte de acumulador, regulador y refrigerador, denominada caracterización consumo (CC) y la segunda, estudia el comportamiento energético de la parte del refrigerador más SFVA, denominada caracterización generación (CG) Ahora bien, la segunda y más importante etapa se basa en la caracterización y en determinar el modelado matemático de consumo energético del refrigerador electrificado por el SFVA, este se denominó modelado refrigerador (MR). Estas dos etapas principales al igual que sus procesos se muestran en la siguiente figura 4.2. Donde

en la parte superior se describe la etapa de caracterización preliminar y la de abajo la etapa de caracterización y modelado.

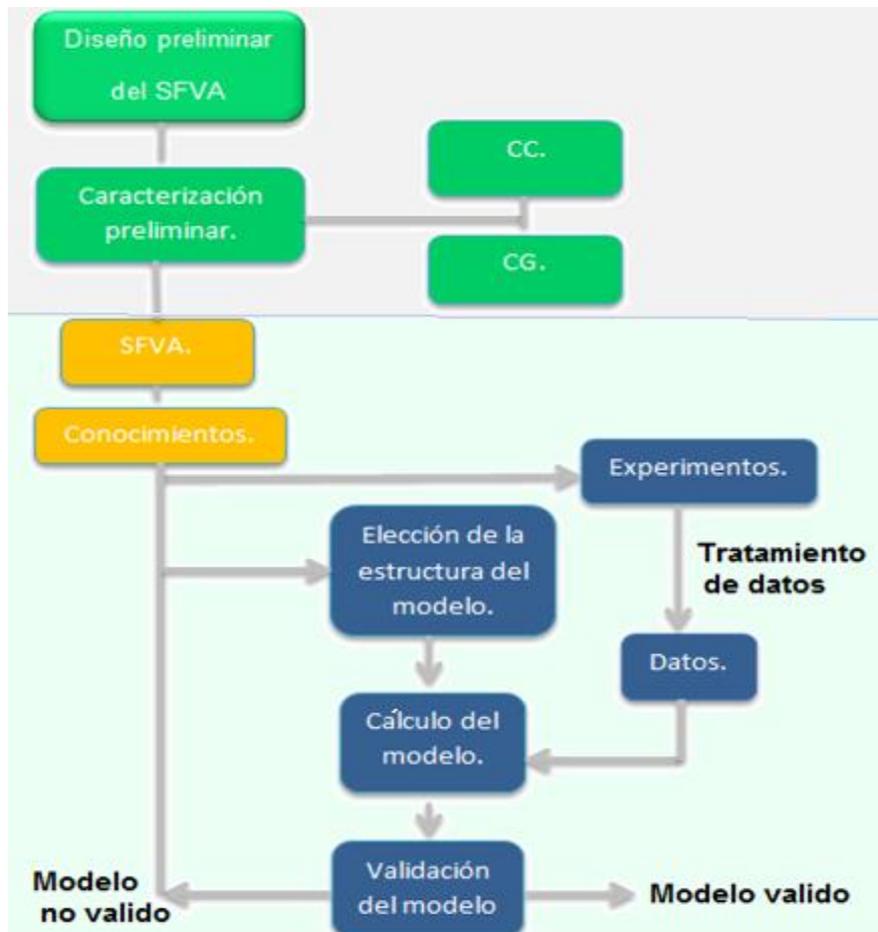


Figura 4.2. Diagrama de desarrollo experimental.

#### 4.1. COMPONENTES USADOS Y PUNTOS DE MEDICIÓN.

Los siguientes equipos pertenecen al SENA y fueron adquiridos para el desarrollo de este proyecto de investigación por medio del Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (SENNOVA).

##### 4.1.1. Módulos fotovoltaicos.

Se utilizaron diferentes configuraciones para generar energía durante las etapas de caracterización preliminar y de obtención del modelo matemático. En la tabla 4.1 se muestra

el modulo que se manejó en la etapa de modelado y en la tabla 4.2 se muestra sus características eléctricas. Estos módulos policristalinos se ubicaron en el techo de la casa con un ángulo de inclinación de  $15^\circ$  respecto a la superficie plana, aunque por cuestión de arquitectura de la casa, no se colocaron en una dirección óptima, es decir, mirando la línea Ecuatorial, lo cual incide en la generación de energía fotovoltaica.

Marca	modelo	Cantidad	Potencia max[W]	Voltaje [Vmp]
canadiansolar	CS6X-310P	1	310	36,4
Solartec	KS75T	2	75	16,8

**Tabla 4.1. Módulos fotovoltaicos.**

CanadiansSolar Model type:CS6X-310p	
Potencia máxima nominal (Pmax)	310 W
Voltaje óptimo de operación (Vmp)	36,4 V
Corriente óptima de operación (Imp)	8,52 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	44,9 V
Corriente corto circuito (Isc)	9,08 A
Voltaje máximo en el sistema	1000 V
Corriente máxima en el sistema	15 A

**Tabla 4.2. Etiqueta eléctrica del CS6X7-310P.**



**Figura 4.3. . Módulo fotovoltaico CS6X-310P.**

Durante la etapa de caracterización preliminar se utilizó el regulador de carga marca STECA, modelo 3030. Este es un regulador digital PWM, el cual está diseñado para soportar sistemas hasta de 30 A y tiene la posibilidad de conectarse a sistemas de 12V o 24V. En su pantalla muestra medidas de magnitudes eléctricas, el estado de carga y símbolos que indican el buen o mal funcionamiento del SFV.

En la etapa de desarrollo del MR se instaló el regulador analógico MPPT 75-15, de marca victron energy. El regulador permitió optimizar la energía generada conforme a su función,

además soporta sistemas hasta de 20A y funciona para sistemas de acumulación de 12V o 24V.



Figura 4.4. Regulador de carga digital PPPT.



Figura 4.5. Regulador de carga digital PWM.

#### 4.1.2. Acumulador.

Marca	Modelo	Cantidad	Capacidad [Ah]	Voltaje [V]
Magna	MA 200-12	2	200	12
Magna	MA 120-12	1	120	12
Magna	MA 75-12	1	55	12

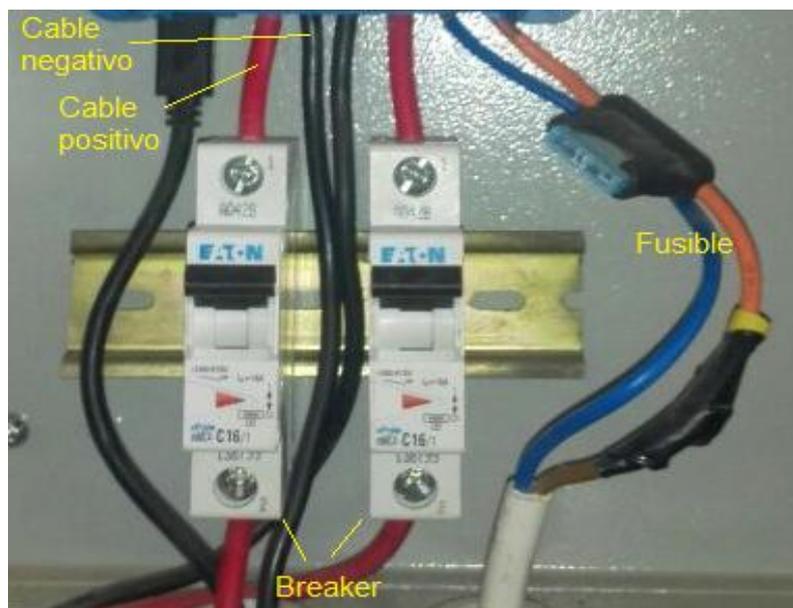
Tabla 4.3. Acumuladores usados en el experimento.

Se utilizaron 4 acumuladores MAGNA tipo gel los cuales se ubicaron dentro del laboratorio junto al refrigerador. Con ellas se realizaron las distintas pruebas durante la etapa de caracterización preliminar. En la prueba de CG se utilizó una configuración conformada por un acumulador de 12V 120Ah, el resto de las pruebas se tuvieron configuraciones con un acumulador.

En cambio, para la etapa de caracterización se utilizó un acumulador de 200Ah a 12V y para el modelado se realizó una configuración en serie con dos acumuladores de 200Ah a 12V.

#### 4.1.3. Cableado y protección.

Se utilizó para la conexión eléctrica cable de calibre 10 AWG, con colores que cumplen la norma técnica, color negro para la polaridad negativa y rojo para la polaridad positiva. Debido a que la aplicación se hace en punto, se utiliza cable con un máximo de 2,5m de longitud para el cable que va del regulador al módulo FV y menor a 1m para el resto de instalaciones, de esta manera se minimiza las pérdidas eléctricas.



**Figura 4.6. Protección y cables usados.**

Para proteger los equipos contra picos de corriente, se usaron dos breakers de 16A, marca EATON y el fusible de fábrica del refrigerador de 15 A.

#### **4.1.4. Sistema de refrigeración por compresión.**

El refrigerador en estudio es un refrigerador marca STECA, tipo baúl (horizontal), este refrigerador tiene una capacidad de 240 L, con unas dimensiones de (91,9 alto x 128,8 largo x 76 ancho) cm. Se puede conectar a sistemas de 12V o 24V ya que está diseñado para funcionar en corriente continua. Además tiene una gran ventaja que es de alta eficiencia (A++) debido a su control rpm con optimización de energía, el cual funciona cuando se activan en modo frigorífico o en modo congelador. Cuando se configura en modo frigorífico se puede programar dentro de un rango de temperatura de 2°C hasta 12°C o si está en modo congelador, se puede programar dentro de un rango de -20°C hasta -10°C. Adicionalmente el equipo dispone de una pantalla que muestra varias funcionalidades, como, la temperatura que

registra el sensor del refrigerador (Tref). También muestra alarma cuando el refrigerador conectado solo al arreglo de acumuladores se encuentra en descarga profunda, desconectándose cuando el voltaje del acumulador este por debajo del establecido. El refrigerante usado en este equipo es el 134 a, es del tipo HFC (hidrofluorcarbono) el cual no contamina la capa de ozono y es de baja toxicidad.

Steca PF 240				
Temperatura ambiente	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
Temperatura interior +8 °C	49 Wh / al día	82 Wh / al día	125 Wh / al día	183 Wh / al día
Temperatura interior +3 °C	82 Wh / al día	125 Wh / al día	183 Wh / al día	256 Wh / al día
Temperatura interior -10 °C	225 Wh / al día	311 Wh / al día	421 Wh / al día	561 Wh / al día
Temperatura interior -20 °C	421 Wh / al día	561 Wh / al día	739 Wh / al día	964 Wh / al día

**Figura 4.7. Etiqueta Energética del refrigerador.**



**Figura 4.8 . Refrigerador DC por compresión.**

#### 4.1.5. Medidor de temperatura.

Para medir temperatura se utilizaron dos equipos: el multímetro fluke 287 y el multímetro 1587, los cuales cuentan con su respectiva sonda integrada de temperatura pt 1000 (termopar tipo K) con una precisión de 0,1°C. Un sensor se utiliza para medir la temperatura interna del refrigerador y el otro para medir la temperatura dentro del volumen a refrigerar. Las señales de los termopares se visualizaron en la pantalla de sus respectivos multímetros. Al mismo tiempo se midió la temperatura ambiente dentro del laboratorio mediante el sensor lm35D el cual tiene un factor de escala lineal de 10mV/°C y una precisión de 0,5°C bajo condiciones de temperatura igual a 25°C.

#### 4.1.6. Medidor de voltaje.

En la etapa de CC se emplea el multímetro fluke para medir el voltaje en el acumulador, el cual cuenta con una resolución de 0.001V para el rango de 50V, mientras que en la etapa de CG se obtiene el voltaje en acumulador por medio del regulador STECA el cual cuenta con una resolución de 0.1 V.

Durante la etapa de MR se obtuvo el valor de voltaje de generación fotovoltaica en el sistema y el voltaje de acumulador por medio del regulador control victron energy 75-15, el cual cuenta con una resolución de 0.01 V.

#### **4.1.7. Medidor de corriente.**

En la etapa de CC se emplea una pinza amperimétrica fluke 381 para medir la corriente en el refrigerador. Mientras que en la etapa de CG se obtiene la corriente en el acumulador, la corriente en el panel y la corriente en el refrigerador por medio del regulador STECA 3030.

Por otro lado, durante la etapa de MR se midió el valor de la corriente de generación del sistema, la corriente acumulador y la corriente en el refrigerador por medio del regulador de carga victron energy 75-15. Ambos reguladores entregan las medidas con una resolución de 0,1A.

#### **4.1.8. Sistema de adquisición de datos.**

En diferentes etapas del desarrollo experimental la adquisición de datos se realizó de manera distinta. En la etapa de CC la adquisición de los datos se realizaron de manera manual registrándolos en archivos txt. Después en la etapa de CG los datos se adquirieron por medio del regulador de carga digital PWM y se registraron de manera manual en archivos txt. En cambio, lo que respecta a la caracterización y modelado la adquisición se realizó por medio de un sistema de adquisición de datos conformado por un regulador de carga analógico MPPT y el accesorio color control figura 4.8. El regulador MPPT adquiere automáticamente las señales, mientras que el color control recibe la señal por puerto USB y las envía a la web mediante protocolo Ethernet, permitiendo descargar los datos por archivos txt.

En la siguiente tabla se muestran las variables de entrada y salida

Variable (símbolo)	unidad	Descripción
Entrada		
Ta	°C	Temperatura ambiente
Ti	°C	Temperatura interna del refrigerador
Tc	°C	Temperatura en agua.
Ic	A	Corriente que pide el refrigerador (carga)
Ia	A	Corriente que entra y sale del acumulador
Ip	A	Corriente de generación del SFV
Vc	V	Voltaje que pide el refrigerador (carga)
Va	V	Voltaje en el acumulador
Vp	V	Voltaje de generación del SFV
Salida		
Pa	W	Potencia en el acumulador
Pc	W	Potencia en el refrigerador
Pp	W	Potencia de generación del SFV
Ec	Wh	Energía que consume el refrigerador

**Tabla 4.4. Variables de entrada y salida de adquisición.**

#### Datos de entrada.

En la etapa de CC la medida de corriente  $I_c$  que consume el refrigerador se realizó por medio de un amperímetro fluke 381. El voltaje  $V_c$  se midió en el sector de cargas del regulador. En el caso de la temperatura  $T_a$  se situó la sonda en la misma posición para cada prueba a 50cm por encima del refrigerador. Las anteriores medidas se registraron de manera manual y con un muestreo cada 30min en un rango de tiempo de 8:30h a 12:00h y de 14:00h a 18:00h.



**Figura 4.9. Medición de  $T_i$ .**

Para la CG las pruebas se realizaron en un rango de tiempo de 8:00h a 12:00h y de 14:00h a 18:00h. En este caso la medición se hizo considerando los tiempos de apertura del refrigerador como se verá más adelante. Las siguientes variables se registraron manualmente en archivos txt antes de abrir y después de cerrar la puerta:  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $V_a$ ,  $I_p$   $I_a$  y  $I_c$ . La variable  $T_i$  se midió colocando la sonda, aproximadamente en el centro de la cabina, como se ve en la figura 4.9.

En la etapa de caracterización y de modelado las mediciones de corriente y voltaje en cada componente del SFV, se adquirieron mediante el regulador de carga VICTRON ENERGY 75-15 y el color control. El muestreo de las variables:  $I_c$ ,  $I_a$ ,  $V_p$  y  $V_a$ , se realizó minuto a minuto durante las 24 horas del día para establecer correctamente el consumo energético del refrigerador y el comportamiento del SFV. Aparte de otras funciones, el regulador tiene la opción de descargar los datos en archivo txt figura 4.11; todo este proceso de medida y visualización es automático.



Figura 4.10. Color control.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	timestamp	Gateway [0]	Solar Charger [256]	Solar Charger [256]	Solar Charge	Solar Charger [256]	Solar Charge	Solar Charger [256]	Solar Charger [256]
2	America/Bogota (-05:00)	CCGX Relay : Battery voltage		Battery current	Load state	Load current	Charge state	PV voltage	PV current
3			V	A		A			
4	2017-04-03 00:00:09	Open	25,67	-1,7	On		1,3	Off	0,06
5	2017-04-03 00:01:09	Open	25,65	-1,7	On		1,5	Off	0,06
6	2017-04-03 00:02:09	Open	25,64	-1,5	On		1,5	Off	0,06
7	2017-04-03 00:03:09	Open	25,82	0	On		0	Off	0,06
8	2017-04-03 00:04:09	Open	25,9	0	On		0	Off	0,06

Figura 4.11. Datos adquiridos por el regulador de carga victron y el color control. Fuente. Victron energy.

Para la temperatura ambiente ( $T_a$ ), la temperatura interna ( $T_i$ ) y la temperatura en carga ( $T_c$ ), el muestreo se hizo cada 15 min, de manera manual, durante el horario establecido de prueba, de 8:00 h a 12:00 h y de 14:00 h a 18:00 h. Adicionalmente, en las pruebas en las que se abre la puerta del refrigerador, se tomaron las tres temperaturas antes de abrir y después de cerrarla. Para medir la temperatura ambiente se ubicó el sensor por encima del refrigerador adquiriendo los datos por medio de una entrada analógica del micro-controlador ARDUINO 1. Por último, para medir la temperatura en carga, se sumergió el sensor en una botella pet con agua, de capacidad 1,5L.

### Datos de salida.

Los datos de salida para todas las pruebas se obtuvieron de manera indirecta, por medio de ecuaciones que relacionan las variables de entrada con la salida.

Para hallar la potencia en cada elemento del sistema se utilizó:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \times I_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \bar{P} \quad (4.1)$$

Donde:

$n$  = numero de datos por día.

$V_i$  = voltaje  $i$  del elemento en estudio [V].

$I_i$  = corriente  $i$  del elemento en estudio [A].

$P_i$  = potencia  $i$  del elemento en estudio [W].

$\bar{P}$  = potencia promedio diario del elemento en estudio [W].

Para hallar la energía de consumo por el refrigerador  $E_c$  o la energía patrón del sistema, se utilizó:

$$E_c = \bar{P} \times t \quad (4.2)$$

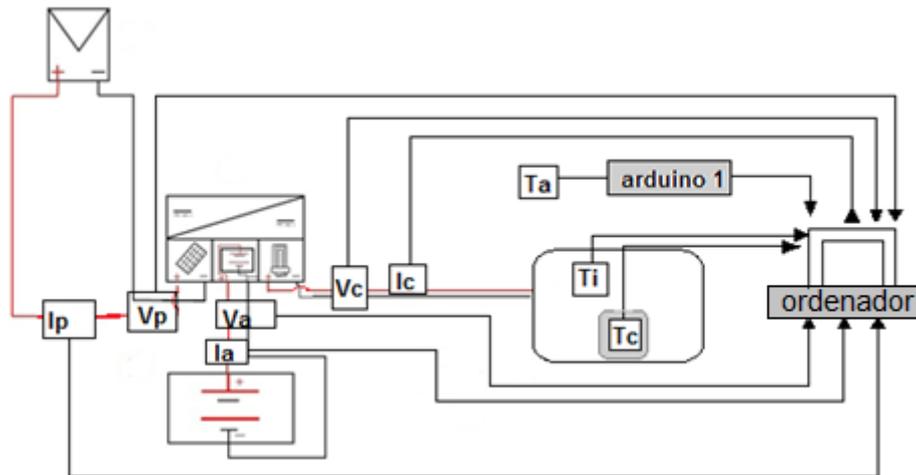
Donde:

$E_c$  = Energía (patrón) consumida por el refrigerador por día. [wh/día\*] (medida por el color control).

$\bar{P}$  = Potencia promedio consumido por el refrigerador. [W]

$t$  = tiempo en el cual el refrigerador pidió potencia durante el día. [horas]

Debido a la gran cantidad de datos fue necesario implementar un algoritmo en el software MATLAB<sup>TM</sup> R2013b, donde se introdujo la base de datos que contuvieran a  $I_c$ ,  $V_a$  y a  $t$  para calcular. Primero mediante la ecuación (4.1) se obtiene  $\bar{P}$  y segundo con la ecuación (4.2) se obtiene la energía  $E_c$ . Anexo B.1.



**Figura 4.12. Equipos e instrumentos de medida usados en el experimento.**

#### **4.2. PRE SELECCIÓN DE VARIABLES EN EL EXPERIMENTO.**

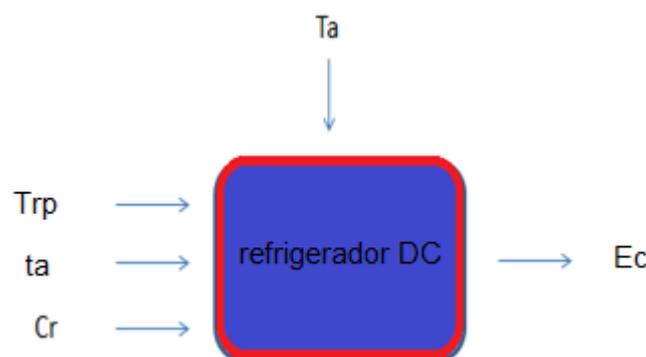
Como se mostró en el capítulo 2 son diversas las variables que influyen en la carga térmica del refrigerador. La elección de las variables independientes para este análisis se hizo teniendo en cuenta el marco teórico en la materia, limitándolas en relación con la finalidad del estudio y con las capacidades experimentales del mismo. En este sentido, se consideran despreciables i) el intercambio de calor por las paredes del refrigerador y ii) los aportes de calor por el motor, personas y luminarias. Por otra parte, debido a que experimentalmente no fue posible controlar la temperatura ambiente por limitaciones técnicas, se efectuó únicamente su monitoreo.

Por lo anterior, las variables independientes que se van a tener en cuenta en este proyecto son: Temperatura de refrigeración programada ( $T_{rp}$ ), tiempos de apertura ( $t_a$ ) y carga a refrigerar ( $C_r$ ) y la variable dependiente la energía consumida por el refrigerador ( $E_c$ ), la

variable dependiente la energía eléctrica de consumo por el refrigerador y la temperatura ambiente ( $T_a$ ) de variable perturbadora, tal y como se presenta en la figura 4.13. Teniendo en presente que diversos alimentos requieren de diferentes temperaturas para conservarse, entre ellos la leche  $3^{\circ}\text{C}$  y el pescado por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , se escogieron tres niveles para la  $T_{rp}$ , que principalmente abarcaron un rango donde la leche y el pescado son adecuadamente conservados. Por su parte el tiempo de apertura también fue considerado, debido a que hay diferentes aplicaciones que requieren de un mayor o menor tiempo de apertura, como una bodega de alimento donde el tiempo de apertura es mínimo en comparación al tiempo de apertura requerido por un refrigerador ubicado en una tienda. De igual forma el producto a refrigerar depende de la dinámica particular de cada usuario, debido a que los productores tienen diferente capacidad de producción, por lo tanto no se va a conservar la misma cantidad de producto, por lo anterior se varió la capacidad dentro de un rango establecido.

Variable	símbolo	unidad
Temperatura de refrigeración programada	$T_{rp}$	$[^{\circ}\text{C}]$
Tiempo por cada apertura	$t_a$	min
Carga a refrigerar	$C_r$	L

**Tabla 4.5. Variables independientes del sistema.**



**Figura 4.13. Sistema de refrigeración con entradas y salida.**

### **4.3. PROCESO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO GENERAL DE PRUEBAS.**

El proceso experimental está descrito mediante el mapa conceptual de la figura 4.14.

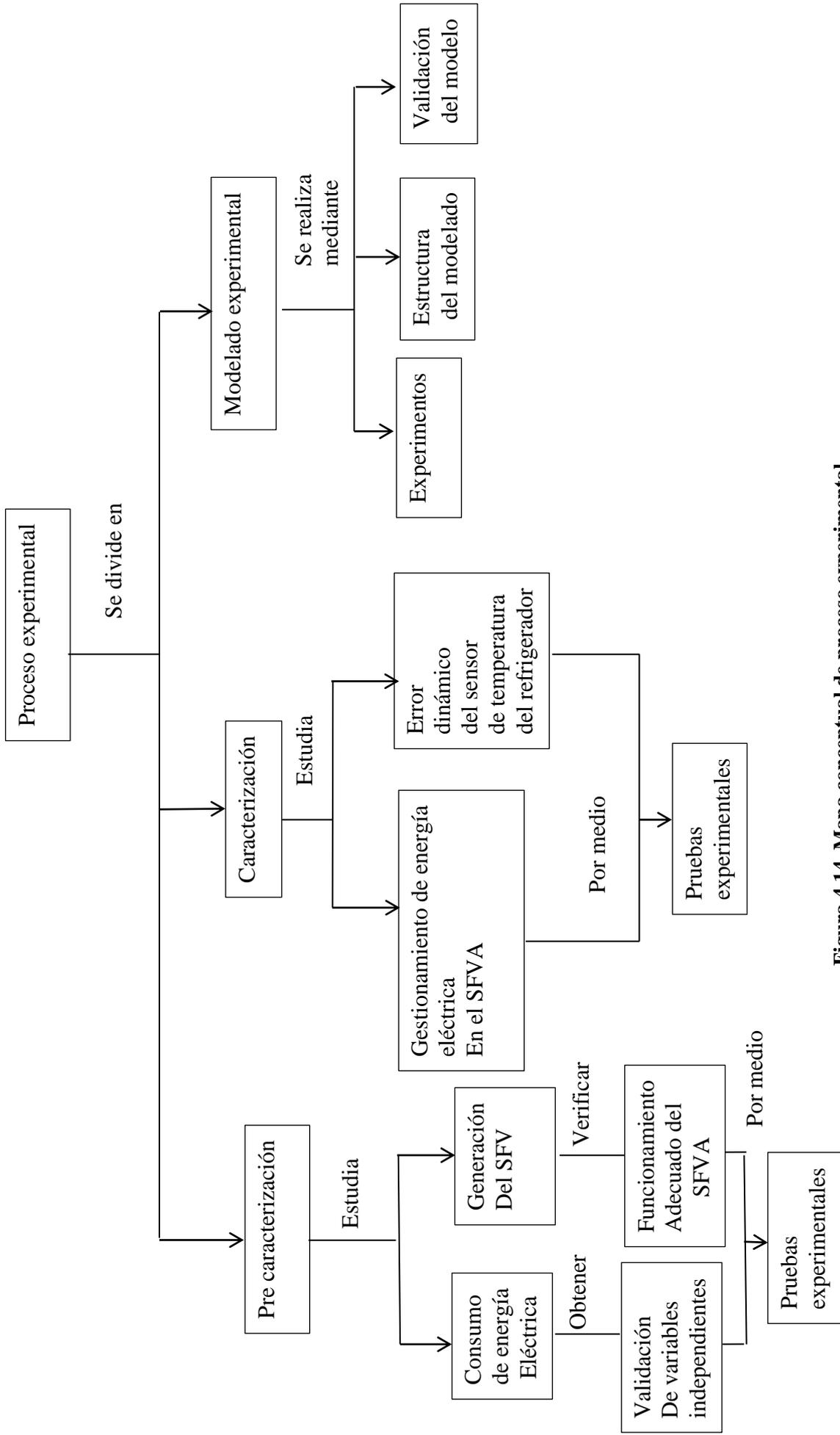


Figura 4.14. Mapa conceptual de proceso experimental

Respecto a las pruebas experimentales se tuvieron en cuenta una serie de procedimientos generales, antes, durante y después.

Procedimientos antes de la prueba.

- Establecer condiciones: establecer condiciones de las variables (Trp, ta, Cr); el valor de la Trp se programa un día antes. Establecer el horario de la prueba y por último asegurarse que el refrigerador no tenga fuentes de calor no estipuladas.

*(El valor de ta es el tiempo por cada apertura de la puerta del refrigerador)*

- Preparación de dispositivos. Alistar los equipos de medición y de registro de datos.
- Medir y registrar Ta.

Procedimientos durante la prueba.

- Observar y registrar medidas de las magnitudes.
- Verificar que el sistema funcione adecuadamente.

Procedimiento después de la prueba.

- Realizar tratamiento de los datos obtenidos para su posterior análisis.
- Comparar, cuando sea necesario, con los datos de energía que da el fabricante.<sup>1</sup>

#### **4.4. CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA ENERGÉTICO DE UN REFRIGERADOR FOTOVOLTAICO.**

##### **4.4.1. Caracterización consumo (preliminar).**

En todo sistema a modelar, la primera fase consiste en identificar las variables que pueden influir en el desempeño del mismo. Sí se tiene información previa del sistema se pueden clasificar variables potenciales y después comprobar sus relaciones por medio de la experimentación.

---

<sup>1</sup> Siempre tener presente estas condiciones básicas de procedimiento, porque a medida que se describa cada corrida de pruebas y cada prueba, en unas ocasiones, sí es necesario se recordaran, pero en otras ocasiones se pasaran por alto

En este experimento ya se han identificado tres variables debido a la información teórica del tema tratado. Con las siguientes pruebas descritas en la tabla 4.5 se va a comprobar su relación analizando la curva de voltaje en el acumulador vs el tiempo de descarga.

		Trp [°C]		
Ta		-10	3	8
[min]	0	Prueba 1	Prueba 4	Prueba 7
	5	Prueba 2	Prueba 5	Prueba 8
Ta	5	Prueba 3	Prueba 6	Prueba 9
[min]				
Cr [L]	10			

Tabla 4.6. Serie de pruebas variando Trp, Cr y ta.

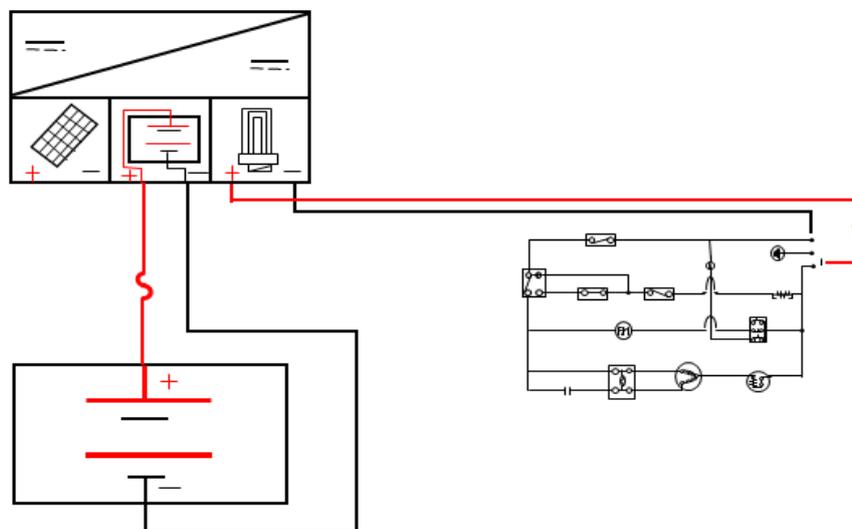


Figura 4.15. Sistema usado para la determinación de las variables de entrada.

Con los dispositivos que se ven en la figura 4.15 se diseñó una serie de pruebas con condiciones especificadas en la tabla (4.6), donde se observó que en las filas varía la Trp en niveles de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$  y  $8^{\circ}\text{C}$ , y en las columnas la Cr en los niveles de 0 L y 10 L; por su parte ta varía en dos niveles 0 min y 5 min. Estas aperturas se realizaron en tiempos equidistantes dos veces por hora.

#### 4.4.2. Caracterización Generación (preliminar)

Es importante que el SFVA abastezca en todo momento de energía el refrigerador para la ejecución del experimento, también saber si el tipo de SFVA (de 12V o de 24V) influye en la forma de consumo energético de un refrigerador; por lo tanto, para garantizar la generación de energía y determinar si el tipo de SFVA afecta el consumo se realiza una serie de pruebas

sistema	Panel Fotovoltaico			Acumulador			Regalador de carga
	Cantidad	Característica	Serie/paralelo	Cantidad	Característica	Serie/paralelo	
1	1	24V/310W	-	2	12V/120Ah	serie	Steca 3030
2	2	12V/75W	Paralelo	1	12V/200Ah	-	Steca 3030
3	1	12V/75W	-	1	12V/200Ah	-	Steca 3030
4	1	12V/75W	-	1	12V/55Ah	-	Steca 3030

**Tabla 4.7. SFVA usados en las pruebas CG.**

	Días del mes de Junio 2016		
	Temperatura programada		
sistema	-10°C	3°C	8°C
1	1 y 2	-	-
2	3 y 4	5 y 6	7 y 8
3	9 y 10	-	-
4	11 y 12	-	-

**Tabla 4.8. Pruebas realizadas en CG.**

donde se dimensionan cuatro diferentes SFVA, como se observa en la tabla 4.6, iniciando con un sistema tipo 24V y terminado con otro tipo 12V, para unas mismas condiciones modificando solamente la Trp en -10°C, 3°C y 8°C como se puede ver en la tabla 4.7. Por consiguiente se va comparar los cuatro sistemas por medio del consumo potencia a través del tiempo.

Desde la prueba 1 hasta la 11 la apertura se realizó durante 5 min dos veces por hora, en tiempos equidistantes. Por el contrario, para la prueba 12 la apertura se llevó a cabo durante 5 min 6 veces por hora. Para las pruebas 10, 11 y 12 cada vez que el refrigerador requería corriente, a partir de ese momento se adquiriría datos cada 3 min de la  $I_c$ ,  $V_a$  y  $T_i$  hasta que la dejaba de pedir.

#### **4.5. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y SFVA.**

Es importante establecer características del refrigerador DC debido a que el fabricante no especifica en detalle sobre su funcionamiento, lo que impide conocer su comportamiento. Por tal motivo para describir cómo el refrigerador conectado al SFVA realiza la gestión de energía, el comportamiento de potencia y características del sensor de temperatura del refrigerador, se realizan una serie de pruebas con ciertas condiciones descritas a continuación.

##### **4.5.1. Gestionamiento energético del SFVA y refrigerador.**

Mediante curva de potencia vs tiempo del acumulador, el módulo fotovoltaico y la carga se pueden establecer el comportamiento energético de un sistema de refrigeración electrificado por un SFVA. Determinando los momentos en que el refrigerador consume energía lo que permite tener un buen conocimiento del sistema. Las curvas iniciales se obtienen variando niveles de  $T_{rp}$  en  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$  y  $8^{\circ}\text{C}$ , a partir de las pruebas del modelado se pueden obtener estas curvas.

##### **4.5.2. Característica dinámica del sensor del refrigerador dc.**

Para determinar el tiempo que tarda la cabina del refrigerador en llegar desde una temperatura inicial a una temperatura final y el error dinámico del sensor del refrigerador se realizan las siguientes pruebas.

- La siguiente prueba se realizó para determinar el tiempo de respuesta del sensor de temperatura. La prueba consistió en cambiar la  $T_{rp}$  de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $-10^{\circ}\text{C}$ ; se empezó a medir la  $T_i$  por medio de la termocupla conectada al multímetro fluke ubicada en el centro de la cabina del refrigerador; también se registró  $T_{ref}$ , las medidas se realizaron cada 5min.
- De igual forma, esta prueba se realizó con el objetivo de determinar el error dinámico y el tiempo de respuesta del sensor. Se dejó la  $T_{rp}=3^{\circ}\text{C}$  constante durante la prueba, abriendo la puerta durante 5 min dos veces por hora desde las 14:00 h hasta las 16:00 h, se monitoreo las temperaturas ( $T_{ref}$  y  $T_i$ ).
- En las pruebas (1 y 2) de la tabla 4.9, se estableció condición inicial de temperatura en cabina igual a temperatura ambiente. Seguidamente se cerró la puerta monitoreando temperaturas ( $T_i$ ,  $T_{ref}$ ) hasta llegar a una temperatura previamente programada ( $3^{\circ}\text{C}$  y  $-10^{\circ}\text{C}$ ). De la misma forma se realizó la prueba 3, a diferencia que después de cerrar la puerta, se abrió la puerta durante un minuto cada 15 min.

Prueba	$T_{rp}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$t_a$ [min]	$C_r$ [L]
1	3	0	0
2	-10	0	0
3	-10	1	0

**Tabla 4.9. Pruebas de caracterización del sensor del refrigerador.**

#### **4.5.3. Determinar la curva de mínimo consumo energía del refrigerador.**

Establecer el mínimo consumo del refrigerador permite saber el dimensionamiento mínimo del SFVA para generar esa energía. Para hallar estos consumos se midió  $E_c$  variando las condiciones que se muestran en la tabla 4.10.

Prueba	Trp [°C ]	ta [min]	Cr [L]
1	-20	0	0
2	-15	0	0
3	10	0	0
4	12	0	0

**Tabla 4.10. Pruebas de mínimo consumo del refrigerador.**

#### 4.6. MODELADO MATEMÁTICO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL REFRIGERADOR.

El modelo matemático permite relacionar las variables independientes con la dependiente mediante una función. Con esta relación se puede obtener el valor de salida del sistema modificando los valores de entrada. Para encontrar la relación de las variables se realizaron una serie de pruebas experimentales donde se modificaron las variables seleccionadas de manera sistemática dando así información del sistema energético del refrigerador y a través mediante herramientas matemáticas permitan construir el modelado por el método de regresión lineal. Se iniciaron las pruebas con un diseño experimental no aleatorizado, en cada corrida se estudió la información obtenida y bajo ese análisis se decidió el diseño de las siguientes corridas de pruebas, de tal forma que permitieran dar información, comprobar su capacidad de predicción del modelado y refinarlo con el fin de que sea cada vez más representativo del sistema. En ese sentido se consideraron dos modelados utilizando mínimos cuadrados: el primero se eligió el método por regresión polinomial y el segundo por regresión lineal múltiple.

En la figura 4.16 se muestra la metodología con la que se halló el modelado matemático, el cual consta de un ciclo que se realimentó a medida que se desarrollaron los experimentos hasta un punto en que se obtuviera una buena representación del modelado. Donde se planteó que una buena precisión estaba por errores relativos por debajo del 30% respecto a la energía patrón  $E_c$ . En este punto la función matemática hallada puede predecir el valor de la energía consumida por el refrigerador DC, con menor error que la que predice el fabricante.

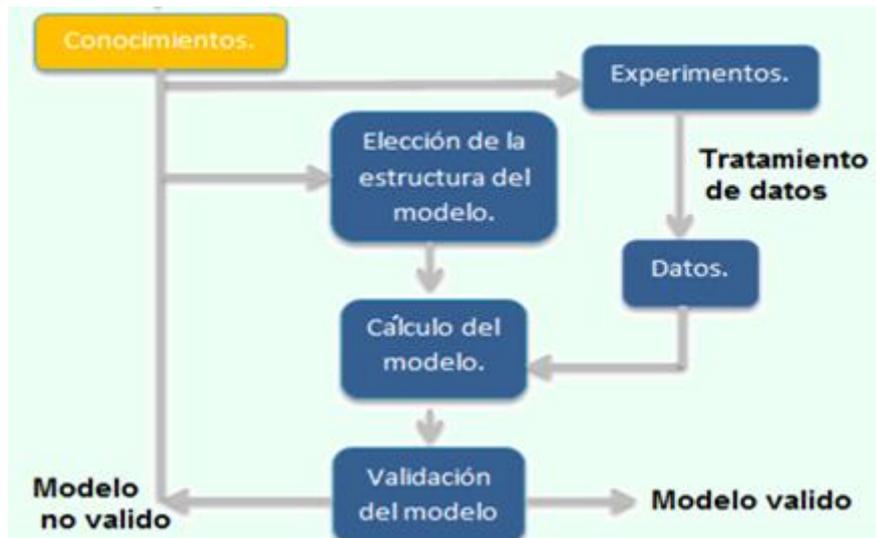


Figura 4.16. Diagrama de flujo de metodología experimental del modelado

#### Procedimientos para realizar pruebas de apertura.

- Establecer condiciones. Se abrió la puerta una vez por hora, el horario de experimentación de 8:00 h a 12:00 h y de 14:00 h hasta las 16:00 h.
- Abrir la puerta del refrigerador durante un tiempo  $t_a$  definido.
- Cerrar la puerta del refrigerador al cumplirse  $t_a$ .
- Repetir los dos últimos pasos según el número de aperturas por hora y el horario de trabajo.

#### Procedimiento para pruebas con carga a refrigerar.

- Establecer condiciones. Establecer variables. horario de experimentación de 8:00 h a 12:00 h y de 14:00 h hasta las 16:00 h.
- Almacenar las botellas en un mismo lugar hasta antes de la prueba.
- Abrir la puerta del refrigerador e introducir los la carga
- Cerrar la puerta una vez introducida la carga.
- Sacar las botellas a las 7:40 del día siguiente.

#### Procedimiento para pruebas con tiempos de apertura y con carga a refrigerar.

- Establecer condiciones. Una apertura por hora, el horario de experimentación de 8:00 h a 12:00 h y de 14:00 h hasta las 16:00 h.
- Almacenar las botellas en un mismo lugar hasta antes de la prueba.
- Abrir la puerta del refrigerador e introducir la carga a refrigerar y dejarla abierta durante  $t_a$  contados desde que se abre.
- Cerrar la puerta una vez cumplido  $t_a$ .
- Seguir con el proceso de apertura y cierre según las condiciones establecidas.
- Sacar las botellas a las 7:40 del día siguiente

#### 4.6.1. Determinación de la dependencia de la variable dependiente $E_c$ con las variables independientes $Trp$ , $t_a$ y $Cr$ .

En un modelado que no parte de principios físicos para hallar la relación matemática si no mediante datos experimentales, conocer propiedades del sistema es fundamental para su entendimiento. Por lo anterior, para conocer la forma en que depende la energía con las variables involucradas se realizaron una serie de pruebas donde se modificaron las variables  $Trp$  y  $t_a$  dejando  $Cr$  constante. Primero se estudia la curva  $E_c$  vs  $Trp$  dejando  $t_a$  y  $Cr$  constantes y segundo se estudia la curva  $E_c$  vs  $t_a$  dejando  $Trp$  y  $Cr$  constantes.

**Dependencia de  $E_c$  con  $Trp$ ,  $t_a$ .** Se implementó una serie de pruebas sistemáticas expresadas en la tabla 4.11 las cuales se ejecutaron en el mes de agosto (época de sequía).

	Trp [°C]			
		-10	3	8
$t_a$ [min]	0	Prueba 1	Prueba 5	Prueba 9
	5	Prueba 2	Prueba 6	Prueba 10
	10	Prueba 3	Prueba 7	Prueba 11
	15	Prueba 4	Prueba 8	Prueba 12

**Tabla 4.11. Pruebas donde se varía  $t_a$  y  $Trp$ .**

**Dependencia de  $E_c$  con  $Cr$ .** Con la curva de  $E_c$  vs  $Cr$  dejando  $Trp$  y  $t_a$  constantes se obtiene el comportamiento de la dependencia. Por lo tanto se midió la  $E_c$  en el sistema de

refrigeración variando Cr, como se ve en la tabla 4.12 los niveles de carga a refrigerar estuvieron en un intervalo de 0 L a 48 L para una  $T_{rp} = 3^{\circ}\text{C}$ .

Trp = 3°C , ta = 0 min									
Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Agua [L]	0	6	12	18	24	30	36	42	48

**Tabla 4.12. Prueba donde se vara Cr.**

También se realizaron dos pruebas alternas que se realizaron para ver el comportamiento cuando se introdujo una carga térmica al refrigerador, con  $T_{rp} = -10^{\circ}\text{C}$  y sin apertura del refrigerador.

Trp = -10°C , ta = 0 min		
prueba	1	2
Carga [L]	33	39

**Tabla 4.13. Prueba donde se varía Cr.**

#### 4.6.2. Modelado por regresión polinomial.

Con los datos experimentales de las pruebas anteriormente descritas se realizó el modelado aplicando regresión polinomial para cada una de las variables, utilizando el software RMatlab2013b. Se buscó la curva que más se ajusta a los datos determinada por el factor de determinación.

#### 4.6.3. Determinación de las fluctuaciones experimentales en la medida y refinamiento del modelado.

**Fluctuaciones en la medida.** Los factores o variables que no se pueden medir ni controlar causan una alteración en la medida. Para determinar las causas de fluctuaciones se realizaron

réplicas de las pruebas de la tabla (4.14). Lo que permite comparar las propiedades del modelado con el sistema y a su vez, aumentar la correspondencia de cada modelo.

ta [min]	Trp [°C]		
		-10	3
0	Prueba 1	Prueba 5	Prueba 9
5	Prueba 2	Prueba 6	Prueba 10
10	Prueba 3	Prueba 7	Prueba 11
15	Prueba 4	Prueba 8	Prueba 12

**Tabla 4.14. Prueba donde se varía Trp y ta.**

**Refinamiento.** Se realizó un nuevo experimento con el objetivo de obtener dos propiedades. Primera, permitió tener una estimación más precisa de las causantes de que la medida de Ec varíe. Segunda, se realizaron medidas en niveles intermedios se obteniendo un refinamiento del modelado hallando valores de Ec intermedios.

En esta corrida se establecieron pruebas variando solo la condición de ta en comparación a las anteriores, pero dentro del rango; es decir, ta está entre 0 min y 15 min, como se observa en la tabla 4.14.

ta [min]	Trp [°C]		
		-10	3
24	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
64	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
96	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9

**Tabla 4.15. Pruebas donde se varía Trp y ta en valores intermedios.**

#### 4.6.4. Regresión lineal general.

El modelado de regresión general, permitió relacionar por medio de una ecuación todas las variables del sistema de refrigeración y determinar el valor de la energía. Este modelado se

realizó utilizando la herramienta computacional MINITAB 17, que entrega la ecuación de regresión lineal múltiple y adicionalmente da información estadística.

El primer modelado se implementó con los datos de Energía Ec hallados en las anteriores pruebas, entonces para validar la ecuación se comparó con los datos Ec sacando el error relativo de los datos de energía estimados (Ee) con respecto a los datos de energía patrón Ec.

#### 4.6.5. Balance del sistema.

Hasta el momento en el experimento se ha modificado las variables  $t_a$  y  $Trp$  en varios niveles, determinando así el efecto de sus interacciones. Al contrario de la  $Cr$  que solo se ha realizado pruebas con los valores de  $Trp$  y  $t_a$  constantes sin la posibilidad de determinar las interacciones con las demás variables. Por lo anterior se diseñó una serie de pruebas presenta en la tabla que permitieron interactuar la  $Cr$  y la  $Trp$  para que la ecuación fuese más representativa. A partir de esta información se adicióno los resultados a la ecuación con el fin de refinarla.

		Trp [°C]		
		-10	3	8
Cr [L]	6	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	24	Prueba 4	Prueba 5 Prueba 5,1	Prueba 16
	42		Prueba 6 Prueba 6,1	
	48	Prueba 7	Prueba 8 Prueba 8,1	Prueba 9

**Tabla 4.16. Pruebas donde se varía Trp y Cr.**

#### Regresión lineal general.

Se ajusta los datos adquiridos en el experimento con el fin de relacionar las variables del sistema mediante una ecuación de regresión lineal general.

#### 4.6.6. Validación del modelado.

Las pruebas de validación en un modelado representa el grado de confianza del mismo, entre más pruebas positivas el rango de validez es más amplio. Las pruebas de confianza para verificar la capacidad predictiva del modelado se varían aleatoriamente condiciones dentro del rango como se muestra en la tabla.

Trp = -10°C	
Cr = 11,3L, ta = 32min	Cr = 30,66L , ta = 48 min
Prueba 1	Prueba 2
Trp = 3 °C	
Cr = 14,56L, ta = 56 min	Cr = 41L , ta = 56 min
Prueba 3	Prueba 2
Trp = 8°C	
Cr = 21,76L, ta = 72 min	Cr = 42,37 L , ta = 32 min
Prueba 4	Prueba 5

**Tabla 4.17. Pruebas de validación de modelado modificando ta y Cr.**

#### 4.6.7. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL DISEÑO DEL SFVA Y DEL MODELADO.

La prueba de validez del diseño y del modelado representa la confianza de los mismos determinando que tan aplicable es la herramienta como base para dimensionar SFV.

La prueba consistió en realizar un dimensionamiento del sistema con condiciones iniciales previamente establecidas, ajustadas a necesidades reales.

Prueba	Trp [°C ]	ta [min]	Cr [L]
1	3	16	39

**Tabla 4.18. Prueba de verificación.**

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS.

El tiempo de apertura por prueba es aquel que está relacionada con el tiempo por apertura, número de horas de trabajo y el número de aperturas por hora mediante la siguiente ecuación.

$$tap = (ta)[min] \times (nah)[apertura/hora] \times (nhp)[hora] \quad (6.1)$$

Donde:

$ta$  = tiempo de apertura.

$nah$  = número de aperturas por hora

$nhp$  = número de horas por prueba.

El tiempo de apertura por prueba expresado de esta manera es adecuado para el experimento porque permite controlar  $nah$  y  $nhp$  dejándolos constantes para todas las pruebas en la corrida, causando que  $tap$  dependa solamente de  $ta$ . En las pruebas concernientes al modelado los valores de  $nah$  y  $nhp$  fueron 1 y 8 respectivamente.

### 5.1. CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DC ELECTRIFICADO POR UN SFV.

#### 5.1.1. Análisis de gráfico de la caracterización consumo.

Para un mejor entendimiento de los resultados de esta prueba se parte de la gráfica de  $V_a$  vs tiempo de descarga que entrega la ficha técnica del fabricante.

prueba	Condiciones			ti	ti figura	Vi ± 0,1V	tf	tf figura	Vf ± 0,1V	ΔV = (Vi – Vf)
	Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]							
1	-10	0	0	8:30	8.50	13,1	18:00	18.00	12,7	0,4
2	-10	35	0	8:30	8.50	13,3	18:00	18.00	12,7	0,6
3	-10	35	10	8:30	8.50	13,5	18:00	18.00	12,5	1
4	3	0	0	8:30	8.50	12,9	18:00	18.00	12,7	0,2
5	3	35	0	8:30	8.50	13,5	18:00	18.00	13,0	0,5
6	3	35	10	8:30	8.50	13,2	18:00	18.00	12,7	0,5
7	8	0	0	8:30	8.50	13,2	18:00	18.00	13,0	0,2
8	8	35	0	8:30	8.50	13,0	18:00	18.00	12,9	0,1
9	8	35	10	8:30	8.50	13,1	18:00	18.00	12,9	0,2

**Tabla 5.1. Diferencias de voltaje en el acumulador para pruebas con diferentes condiciones.**

En la tabla 5.1 se presentan los resultados de la caracterización preliminar, los cuales permiten establecer si la energía de consumo depende o no de las variables independientes propuestas. Para empezar, el Voltaje inicial (Vi) que corresponde al tiempo inicial de la prueba (ti =8:30) y Voltaje final (Vf), que corresponde al tiempo final de la prueba (ti =18:00) se obtuvieron mediante mediciones directas en el acumulador usado en las prueba y también, utilizando la ecuación (6.1). Reemplazando las condiciones de esta corrida de pruebas:  $n_{hp} = 7.5$  h,  $n_{ah} = 2$  y  $t_a = 5$  min se obtiene el tap.

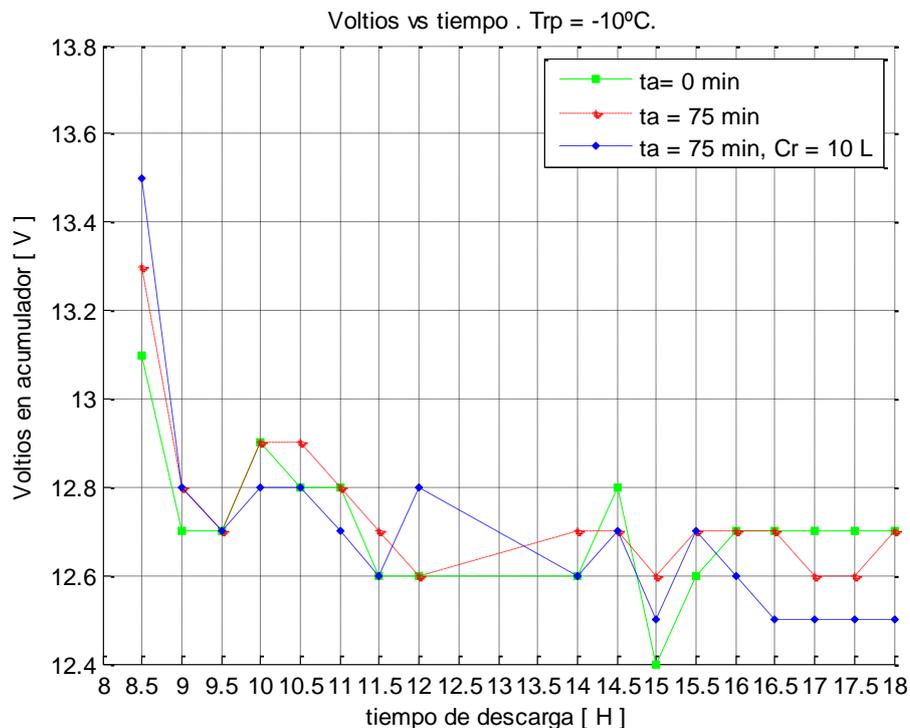
$$tap = (5 \text{ min}) \times (2) \times (7.5) = 75 \text{ min}$$

Las siguientes figuras muestran la variación del voltaje a medida que pasa el tiempo. Cada figura muestra la comparación de diferentes pruebas en las que se varían condiciones de Trp, tap y Cr.

En la figura 5.1 se representan las curvas de voltaje al transcurrir el tiempo para tres pruebas diferentes, donde el sistema está a una Trp = -10 °C. De esta gráfica se observa de forma general que las tres curvas tienen un mismo comportamiento donde el voltaje decrece al

transcurrir el tiempo pasando por picos altos y bajos. Particularmente se tiene que: la prueba de la curva azul se obtuvo  $V_i = 13,5V$  y  $V_f = 12,5V$ , por tanto la diferencia de voltaje es  $\Delta V = 1V$ , siendo ésta diferencia mayor que la obtenida por la curva roja, donde su  $\Delta V = 0,6 V$  y este a su vez es mayor que la prueba representada por la curva verde con un  $\Delta V = 0,4 V$ .

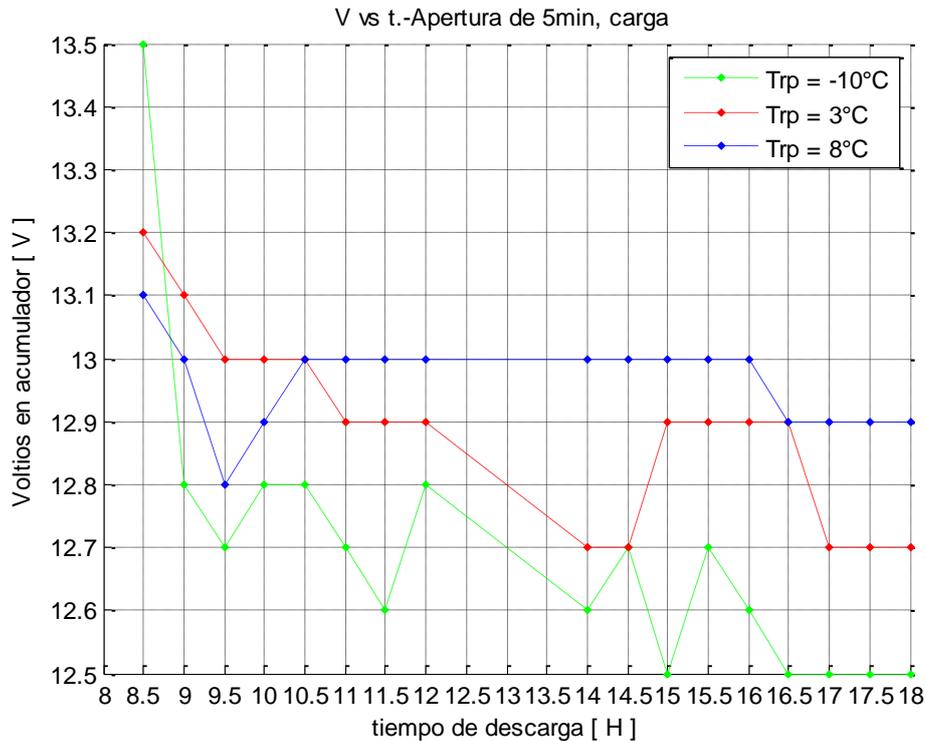
Teniendo presente que una variación de voltaje en el acumulador indica la cantidad de energía que se ha consumido, siendo la mayor variación el mayor consumo y la menor variación el menor consumo. Se puede deducir comparando la curva verde ( $\Delta V = 0,4V$ ) con la roja ( $\Delta V = 0,6V$ ) que, el efecto de variar el tap = 0 min hasta un tap = 75, produce un aumento de consumo de energía por el refrigerador. De la misma manera, si se compara la curva roja con la azul, se tiene que el variar la Cr de 0 L a 10 L, se produce un cambio creciente en el consumo energético por el refrigerador.



**Figura 5.1. Variación del voltaje en el acumulador [V] vs tiempo [h], Con diferentes condiciones de ta y Cr.**

En la figura 5.2 se aprecia que para las tres pruebas, las curvas siguen una variación decreciente, desde un voltaje máximo hasta un voltaje mínimo y entre este lapso presentan oscilaciones con picos altos y bajos. Ahora bien, si se obtiene la diferencia de voltaje entre  $V_i$  y  $V_f$  para la curva verde  $\Delta V = 1 V$ , de tal forma que se compare con el  $\Delta V$  de la curva roja el

cual tiene un valor 0,5 V y de igual forma se compare con el  $\Delta V$  de la curva azul,  $\Delta v = 0,2$  V, entonces se puede decir que para  $Trp = 8^\circ\text{C}$  el consumo es menor que para  $Trp = 3^\circ\text{C}$  y este a su vez es menor para un  $Trp = -10^\circ\text{C}$ , por tanto la energía consumida para este sistema de refrigeración depende de la  $Trp$ .



**Figura 5.2. Variación del voltaje en el acumulador [V] vs tiempo [h]. Con diferentes condiciones de  $Trp$ .**

### 5.1.2. Análisis gráfico de la caracterización Generación.

La tabla 5.2 muestra la estadística de los datos obtenidos en la corrida de pruebas, la numeración de las pruebas corresponde a la misma numeración de la tabla 4.7. También se muestran en la parte izquierda de la tabla las horas y la  $T_a$  en el punto donde se tuvo la potencia máxima ( $P_m$ ) durante la prueba, en la parte derecha se muestran la potencia promedio  $\bar{P}$  y la  $T_a$  promedio ( $\bar{T}_a$ ) en cada prueba.

Prueba	Hora (P máx)	Hora figura	$\bar{P}$ [ W ]	Ta. [ °C ]	Pp [ W ]	$\bar{T}_a$ [°C ]
Temperatura programada = -10°C						
1	15:05	15.08	41.44	-	32.193	-
2	16:30	16.50	53.01	25.1	31.908	23.2
3	11:00	11.00	52.06	22.8	37.872	23.7
4	11:00	11.00	49.32	24.5	40.315	22.136
9	9:00	9.00	45.22	21.9	38.737	24.4
10	16:42	16.70	56.33	-	42.577	-
11	14:54	14:54	49.02	-	41.158	-9.9 <sup>1</sup>
12	11:00	11:77	52.5	-	42.779	-8.7 <sup>2</sup>
Temperatura programada = 3°C						
5	18:05	18.08	49.21	23.8	42.538	22.7
6	12:00	12.00	64.4	25.8	47.938	24.3
Temperatura programada = 8°C						
7	15:30	15.50	69.09	25.4	52.23	24
8	10:05	10.08	60.6	22.4	52.39	22.3

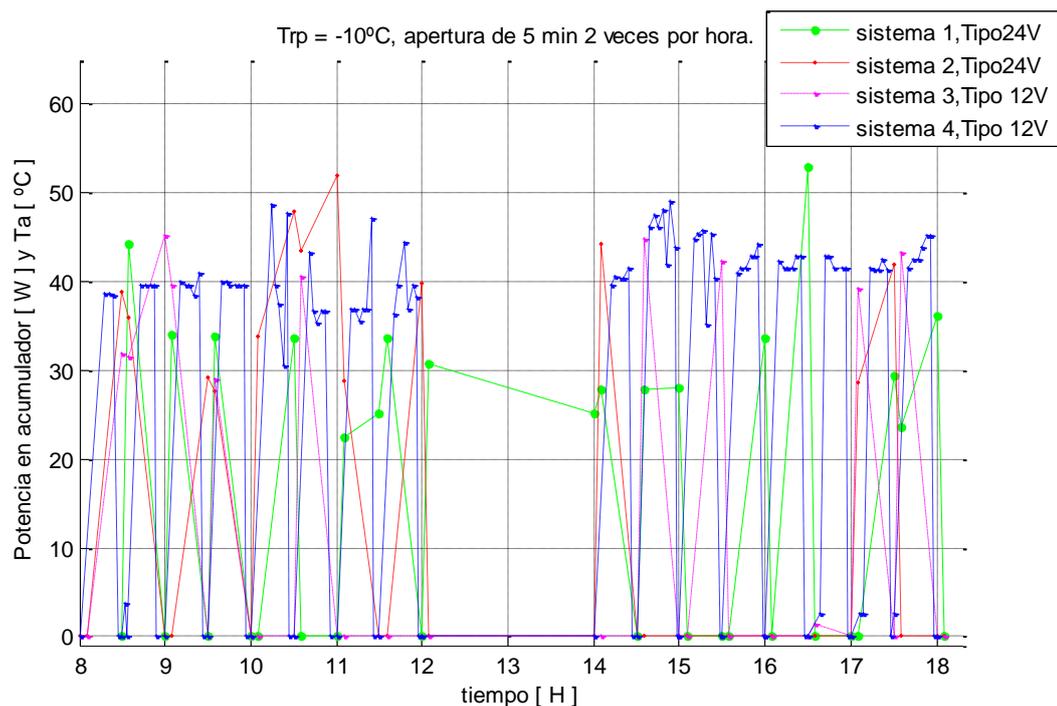
**Tabla 5.2. Estadística de las pruebas de caracterización generación preliminar.**

Los datos de la tabla 5.2 con súper índice <sup>1</sup> y <sup>2</sup> presentan las temperaturas promedio internas del refrigerador.

Se va a determinar características del comportamiento en consumo de potencia del refrigerador conectado a diferentes SFVA comparando los valores mostrados en la tabla (6.2). Donde se observa que el mayor valor de la Pm para iguales condiciones de Trp = -10°C, Trp = 3°C y Trp = 8°C se presentaron para un valor mayor de Ta, como se observa en

las pruebas 4, 6 y 7 respectivamente. Además, comparando la  $\bar{P}$  para las 12 pruebas se obtiene que la mayor  $\bar{P}$  se da para una  $Trp = 8^\circ\text{C}$ ; lo que indica que la  $\bar{P}$  de consumo aumenta cuando la  $Trp$  es mayor. De lo anterior se puede decir que los picos de potencia de mayor magnitud dependen de  $Trp$  y  $Ta$ , presentándose en condiciones de  $Ta$  y  $Trp$  mayores ( $25,4^\circ\text{C}$  y  $Trp=8^\circ\text{C}$ ).

En la figura 5.3 se compara la potencia que consume el refrigerador en unas mismas condiciones de  $Trp$ ,  $tap$  y  $Cr$  pero estando conectado a SFVA con diferentes configuraciones. Mostrando fundamentalmente que el refrigerador estuvo funcionando adecuadamente en todo momento para todos los SFVA y también, que la potencia tuvo un comportamiento regular, con picos promedios que oscilan entre los 40W, por lo tanto no se presentó cambios significativos de potencia entre ninguno de los sistemas y al ser estos de 12V o de 24V indica que en términos de potencia es indiferente la configuración del tipo de SFVA.



**Figura 5.3. Potencia de consumo para diferentes SFV.**

## **5.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CONECTADO AL SFVA.**

### 5.2.1. Gestionamiento energético.

Identificar las etapas de trabajo de cada elemento que compone el SFVA durante el día es importante porque permite observar el modo de operar del refrigerador en términos de potencia, bajo diferentes condiciones durante el día, al igual que el resto de los componentes.

A continuación se va a presentar la función del controlador de carga mediante una gráfica, donde se describe la gestión energética de un SFVA. El cual para estas pruebas se utilizó un regulador MPPT, donde se tuvo condiciones con  $t_p = 0$  min,  $C_r = 0$  L y modificando la  $T_{rp}$ .

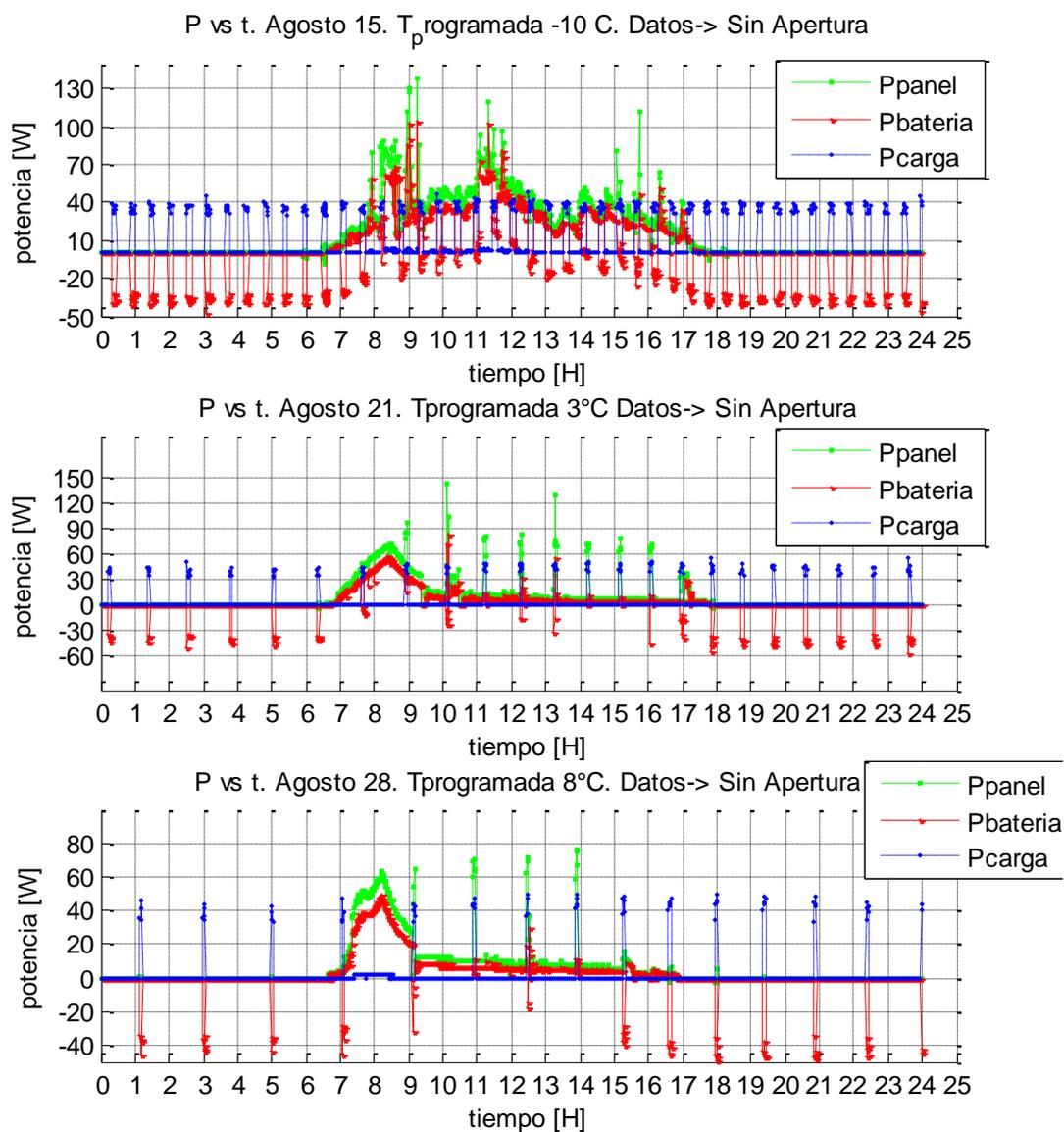


Figura 5.4. Gestión de carga en un SFVA mediante un regulador MPPT para días diferentes y no continuos. a)  $T_{rp} = -10^{\circ}$ C. b)  $T_{rp} = 3^{\circ}$ C. c)  $T_{rp} = 8^{\circ}$ C.

La gestión de carga del regulador, como se puede ver en las tres gráficas tiene dos etapas. En la primera se encuentran en la escala baja y alta del tiempo y la segunda, se encuentra en la parte media de la escala del tiempo. La primera se caracteriza, primeramente porque no hay generación fotovoltaica, también porque los pulsos de potencia tanto en acumulador y en carga son periódicos, con igual magnitud y opuestos, lo que representa que el acumulador electrifica el refrigerador. La segunda etapa se caracteriza porque presenta generación fotovoltaica donde la potencia generada se divide para el acumulador y/o para el refrigerador, según las necesidades del sistema.

Por otro lado, al comparar la potencia en el refrigerador (carga) en las gráficas a, b y c, se puede observar que a medida que se modifica  $T_{rp}$  ( $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$  y  $8^{\circ}\text{C}$ ) los pulsos varían aumentando su magnitud pero disminuyendo su número y su ancho. Evidenciando que los cambios en el comportamiento energético del refrigerador tienen correspondencia con las variaciones de  $T_{rp}$ .

### 5.2.2. Determinar características del refrigerador.

En las siguientes figuras se determina el tiempo que demora el refrigerador en llegar de una temperatura a otra y también comparar las mediciones de temperatura dentro del refrigerador por el sensor tipo k con el sensor del refrigerador.

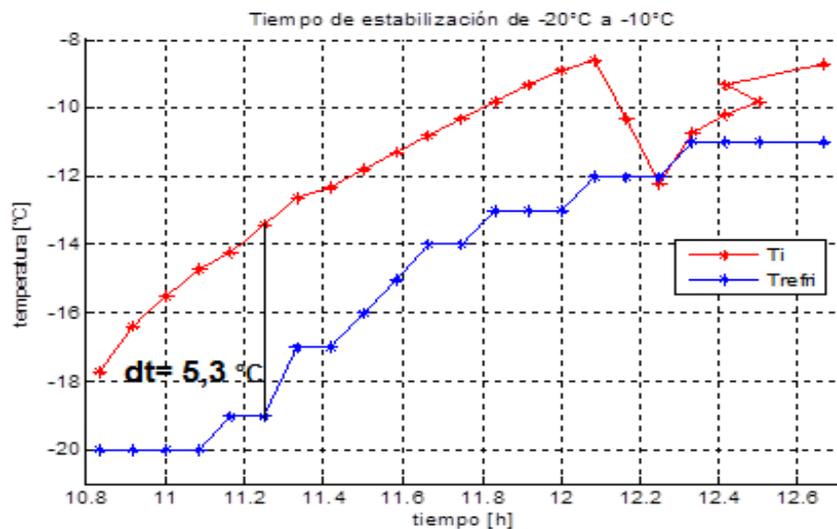
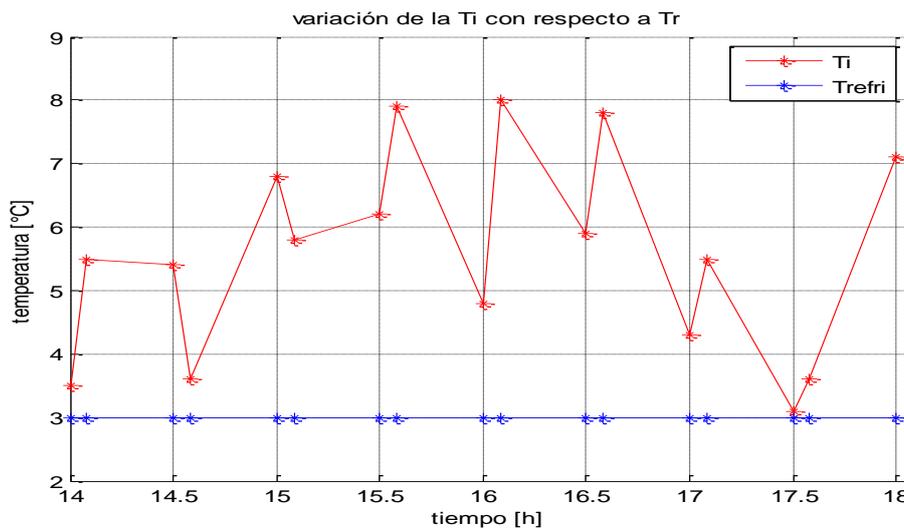


Figura 5.5. Variación de la temperatura interna al transcurrir el tiempo.

1. La figura 5.5 muestra el tiempo que demora en llegar la temperatura interna del refrigerador de  $Trp = -20^{\circ}\text{C}$  hasta una  $Trp = -10^{\circ}\text{C}$ , estando sin carga y con muestreo de 5min

En esta figura se observa que las curvas tanto de  $T_i$  como  $T_{ref}$  son crecientes; En la parte baja de la gráfica se tiene que la  $T_{ref}$  se mantiene constante por aproximadamente 20 min, tiempo en que la diferencia entre  $T_{ref}$  y  $T_i$  es  $4,2^{\circ}\text{C}$ , a partir de ese momento empieza a crecer de forma escalonada hasta llegar a la temperatura programada, manteniendo un  $\Delta T$  casi cte, con un máximo de  $5,3^{\circ}\text{C}$ . El error dinámico en la medida se traduce en que la  $T_{ref}$  llegase aproximadamente 45 min después a la  $Trp$  programada ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) respecto a la  $T_i$ .

2. La siguiente gráfica muestra la comparación de la  $T_i$  con  $T_{ref}$  a una  $Trp = 3^{\circ}\text{C}$ ,



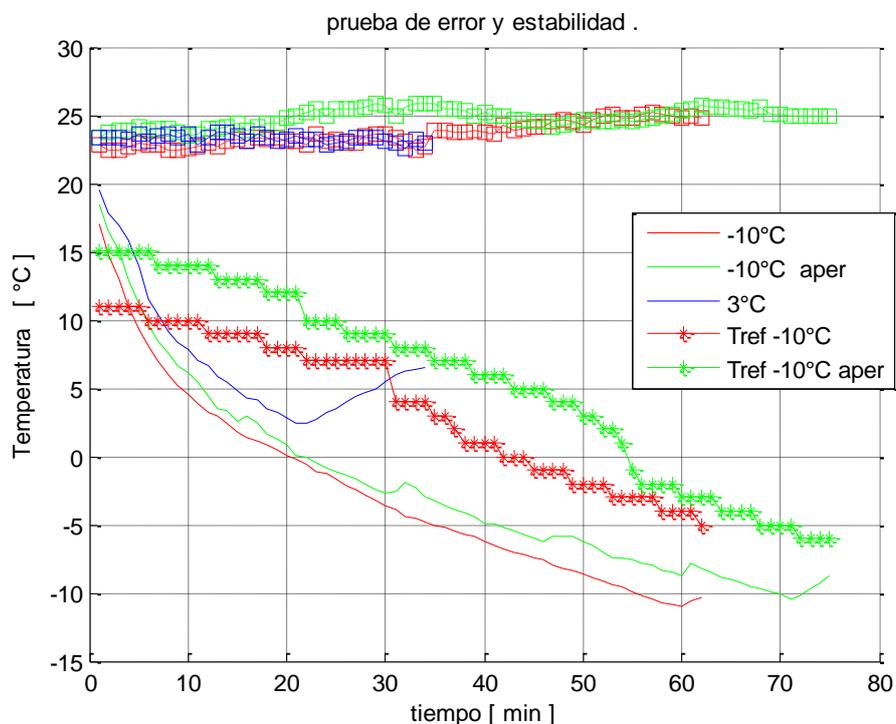
**Figura 5.6. Variación de la temperatura interna del refrigerador con apertura.**

Se puede ver en la figura 5.6 que la  $T_{ref}$  permanece constante durante la prueba, mientras que la  $T_i$  medida por el sensor tipo k oscila en función de las aperturas de la puerta, alcanzando un  $\Delta T$  máximo respecto a la  $T_{ref}$  de  $5^{\circ}\text{C}$  en  $t = 16.08$  ( $t = 16:05$ ), sólo siendo iguales las temperaturas medidas por los dos sensores a las 17.50 h ( $t = 17:30$ )

El error dinámico del sensor del refrigerador mostrado para las dos gráficas anteriores se puede atribuir a que el sensor tipo K está ubicado en el centro de la cabina, mientras que el sensor del refrigerador se encuentra en la parte interna de la puerta, es decir en la parte

superior de la cabina. De igual forma se evidencia con las dos graficas anteriores que el sensor tiene un error de aproximadamente  $\pm 5,3^{\circ}\text{C}$ , es decir, el sensor no responde a la variación de temperatura interna, si  $T_i$  está dentro de  $T_{ref} \pm 5,3^{\circ}\text{C}$ .

Al igual que las dos figuras anteriores en esta figura se desea ver el tiempo de estabilización del refrigerador y comparar las temperaturas medidas, tanto de  $T_i$  como  $T_{ref}$ . A diferencia de las pruebas anteriores esta es una serie de tres pruebas. Donde las curvas azules rojas y verdes corresponden a la pruebas 1, 2 y 3 respectivamente de la tabla 4.9 y en cada prueba la línea continua se refiere a la  $T_i$ , la línea con asteriscos a la  $T_{ref}$  y la línea con cuadrados a la  $T_a$



**Figura 5.7. Variación de la  $T_i$  para diferentes casos.**

En la parte superior de la figura se representa la temperatura ambiente para cada prueba. Se muestra que las  $T_a$  se mantuvieron un mismo rango durante toda la prueba. Respecto a las  $T_i$ , se observa que la curva roja y verde (líneas continuas) tuvieron un comportamiento exponencial, teniendo una respuesta más lenta la curva verde, mostrando picos, además requiriendo 15 min de más que la roja para llegar a la  $T_{ref} = -10^{\circ}\text{C}$ . Por lo anterior se debe señalar que la prueba representada por la línea verde se abrió la puerta durante un minuto cada 15 min. A diferencia de los comportamientos de las curvas de  $T_i$  se observa sus curvas

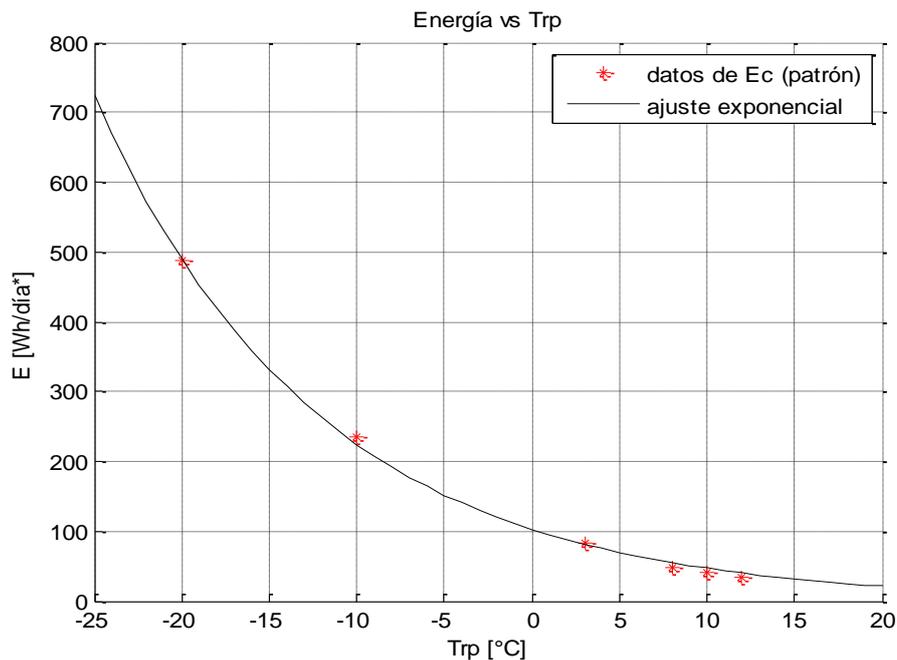
correspondientes de  $T_{ref}$ , donde evidencian un retardo de respuesta respecto a las  $T_i$ . En el caso particular de la curva azul tiene una caída exponencial formando una parábola una vez llega a su  $Trp = 3^\circ\text{C}$ , con un tiempo aproximado de 20 min entre  $T_a$  y  $Trp=3^\circ\text{C}$ .

### 5.2.3. Mínimo consumo de energía del refrigerador.

El comportamiento del modelo lo representa la ecuación (6.2), en la cual la variación de  $E$  con  $Trp$  es una exponencial quien se ajusta a los datos.

$$E_{min} = 102,8 e^{-0,08 \times Trp} \quad (6.2)$$

La curva del modelo sitúa un límite mínimo consumo de energías, es decir, no son posible obtener energías por debajo de la curva.

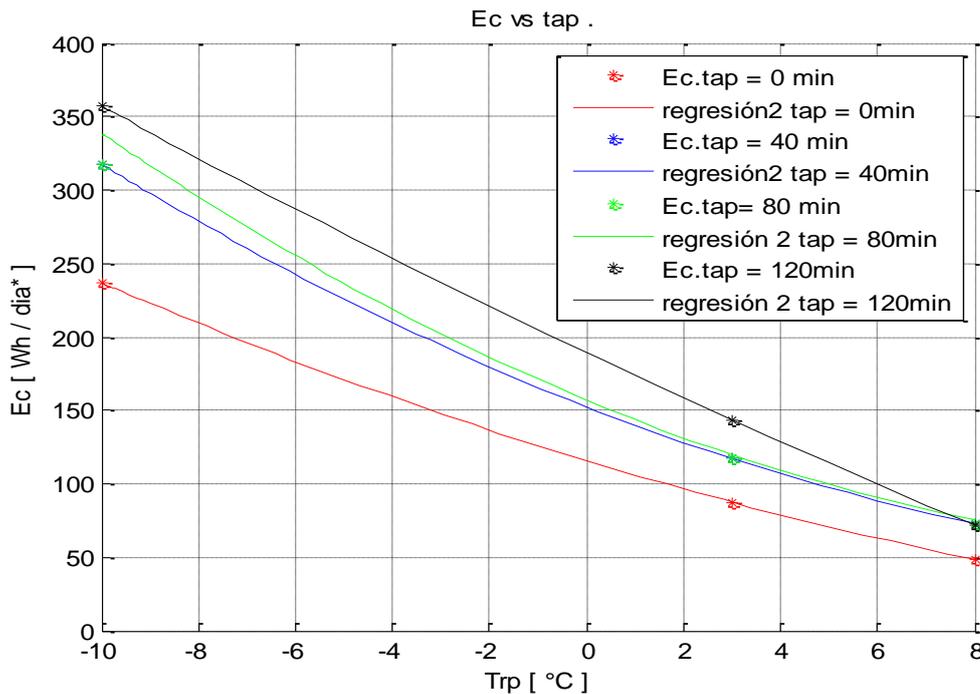


**Figura 5.8. Variación de la la Energía Ec respecto a Trp.**

### 5.3.MODELADO MATEMÁTICO EXPERIMENTAL.

#### 5.3.1. Dependencia de la Ec con Trp y tap.

- Análisis gráfico Ec vs Trp.



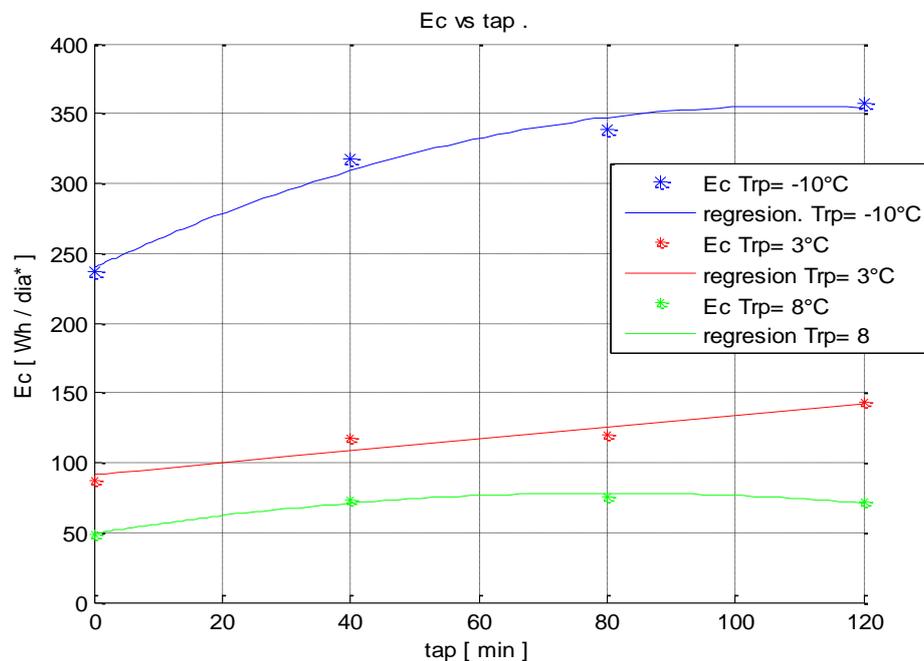
**Figura 5.9. Dependencia de la Ec con Trp.**

La figura 5.9 presenta cuatro pruebas con diferente tap, las cuales representan la dependencia de Ec con Trp, mostrando un comportamiento decreciente. Donde a mayor Trp la energía consumida por las diferentes pruebas es menor y las curvas tienden a converger, evidenciando que el consumo de energía no depende de los tap cuando la Trp se aproxima a la temperatura ambiente. En contraste con Trp menores, donde la energía crece considerablemente para cada una de las pruebas, evidenciando que la carga térmica crece con Trp menores. También se demuestra en Trp= -10°C, que de un estado sin apertura (curva roja) a otro con apertura (curva azul), el aumento de consumo energético es representativo en comparación con los aumentos de energía entre tap diferentes de 0 min (curva azul y curva verde).

- Análisis gráfico de Ec vs ta.

En la figura 5.10 se tiene la dependencia de  $E_c$  cuando se varía  $tap$  para tres casos de  $Trp$ . Donde en el modelo representado por la curva azul ( $Trp = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ) tiene un comportamiento potencial al igual que los datos. Además muestra una desviación en la parte central de la escala del tiempo. En cambio, la curva roja está representada por un modelo lineal donde los resultados tienen buena correspondencia a lo largo del rango. Por su parte la curva verde, los resultados corresponden en todo el rango mostrando una parábola con máximo de energía a la altura de los 78 min.

Por otra parte, de las tres curvas se puede evidenciar que para la dependencia de  $E_c$  con  $tap$  se tiene el mismo comportamiento en la parte baja de la escala del tiempo con un cambio significativo del consumo energético, a partir del minuto 40 el comportamiento varía para cada prueba, de tal forma que para el minuto 120 los cambios de  $E_c$  en  $Trp = -10\text{ }^\circ\text{C}$  y  $Trp = 8\text{ }^\circ\text{C}$  el consumo de energía disminuye, lo cual no tienen significado físico, debido a que entre más tiempo este abierta la puerta del refrigerador efectúa un mayor intercambio de calor entre el interior y los alrededores que están a una temperatura mayor, aumentando la carga de refrigeración. Por lo anterior, se evidencia que los resultados del experimento presentan fluctuaciones por factores no controlables.



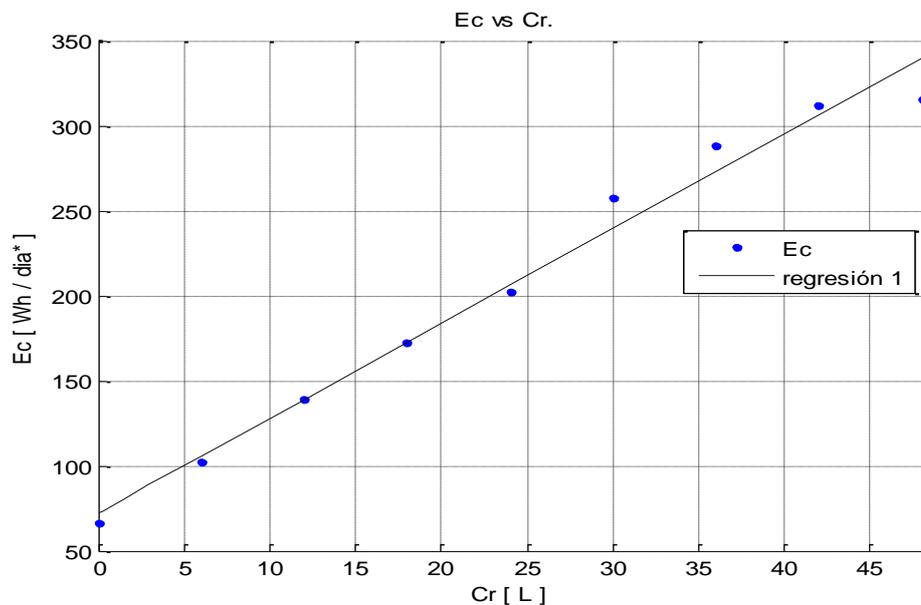
**Figura 5.10. Dependencia de  $E_c$  con  $tap$ .**

### 5.3.2. Dependencia de $E_c$ con $Cr$ .

En la tabla se muestran los datos de respuesta del sistema para una  $Trp = 3^\circ\text{C}$ .

Octubre 2016									
$Trp = 3^\circ\text{C}$ , $t_a = 0 \text{ min}$									
Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Cr$ [L]	0	6	12	18	24	30	36	42	48
$E_c$	65,9	102,3	138,96	172,32	202,27	257,25	288,20	312,25	315,71
$\bar{T}_a$	22,2	22	21,3	20,7	22,8	22,4	22	-	-

**Tabla 5.3. Pruebas de variación de  $Cr$ .**



**Figura 5.11. Dependencia de  $E_c$  con  $Cr$ .**

El modelo está representado por una línea recta la cual evidencia la correspondencia entre el modelo y las mediciones de  $E_c$ . Los datos divergen a partir de los 30 L hasta los 48 L de forma no significativa. En esta prueba se obtiene los mayores datos de energía consumida, en comparación con las demás condiciones.

### 5.3.3. Modelado por regresión polinomial.

Para obtener el modelado, primero se propone un modelo simple, el cual supone que las variables ( $Trp$ ,  $tap$  y  $Cr$ ) son independientes por tal razón se pretende llegar a una ecuación de la forma:

$$E_T = E_1(Trp) + E_2(tap) + E_3(Cr) \quad (6.3)$$

**Dependencia de  $E_c$  con  $Trp$ .** El comportamiento de los modelos en las cuatro pruebas está representado por las siguientes ecuaciones con sus respectivos coeficientes de determinación hallados por medio de un algoritmo en MATLAB R2013b. En el experimento los datos correspondieron en todo el rango.

Para  $tap = 0$  min.

$$Ee_{tap=0} = 115,7 - (10,4 \times Trp) + (0,21 \times Trp^2) \quad (6.4)$$

$$r^2 = 1$$

Para  $tap = 40$  min

$$Ee_{tap=40} = 152,3 - (12,84 \times Trp) + (0,37 \times Trp^2) \quad (6.5)$$

$$r^2 = 1$$

Para  $tap = 80$  min

$$Ee_{tap=80} = 156,9 - (13,7 \times Trp) + (0,45 \times Trp^2) \quad (6.6)$$

$$r^2 = 1$$

Para  $tap = 120$  min

$$Ee_{tap=120} = 189,1 - (15,61 \times Trp) + (0,12 \times Trp^2) \quad (6.7)$$

$$r^2 = 1$$

**Dependencia de  $E_c$  con  $tap$ .** Los comportamientos de los modelos mostrados en la siguiente grafica se representan en las siguientes ecuaciones:

Para  $Trp = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Ee_{Trp=-10} = 239,68 + (2,12 \times tap) - (0,01 \times tap^2) \quad (6.8)$$

$$r^2 = 0,98$$

Para  $Trp = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Ee_{Trp=3} = 91,35 + (0,43 \times tap) \quad (6.9)$$

$$r^2 = 0,92$$

Para  $Trp = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Ee_{Trp=8} = 49,4 + (0,72 \times tap) - (0,004 \times tap^2) \quad (6.10)$$

$$r^2 = 0,98$$

Las ecuaciones mostraron que la mejor función que representa los datos es una polinomial de segundo grado, excepto por la ecuación 6.9 quien mostró un modelo lineal. Esta representación de los modelos aunque fue la mejor debido a que tuvo un buen ajuste, para los casos de  $Ec$  vs  $tap$  no describían el sistema desde lo físico.

#### 5.3.4. Análisis de la fluctuación en la medida y refinamiento del modelado.

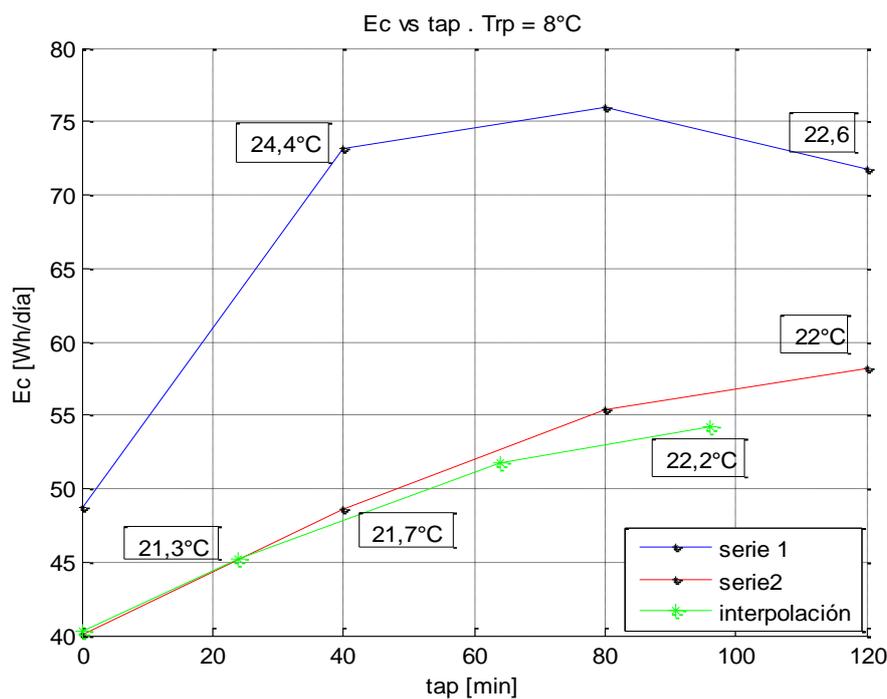
De lo anterior, como el comportamiento de  $Ec$  cuando varía  $tap$  no se determinó de manera adecuada. Se prosiguió a realizar una serie de pruebas con las mismas condiciones de la tabla (4.11) para comparar los resultados de  $Ec$  y así inferir el porqué de las inconsistencias antes mostradas. Por el contrario, la dependencia de  $Ec$  con  $Trp$  y  $Cr$  sí se determinó, además de su comportamiento. Sin embargo, con estos datos se corroboró su comportamiento.

- Dependencia de  $Ec$  con  $tap$  con  $Trp = 8^{\circ}\text{C}$

Después de haber analizado la serie 1 (tabla 4.11), la cual corresponde al mes de agosto donde tuvo una  $Ta$  promedio =  $24,7^{\circ}\text{C}$ , en contraste con la serie 2 (tabla 4.14) quien tuvo una

Ta promedio de 21,°C. En la gráfica se tienen unas etiquetas de Ta para ciertos puntos, con las que se quiere demostrar que a pesar que las pruebas se obtuvieron bajo las mismas condiciones y los resultados mantienen un comportamiento correspondientes a una función potencial, los datos en el eje Ec de la figura 4.12 difieren en magnitud entre las dos series, esto en función de la Ta. Como se puede ver en el minuto 40, los datos de Ec de las dos series tienen una diferencia de aproximadamente 48 Wh teniendo a su vez una diferencia de temperatura =2,7°C, la diferencia de magnitud de Ec se mantiene hasta llegar al minuto 120, donde las curvas tiene a aproximarse en la escala de Ec con una  $\Delta Ec = 14$  Wh cuando la diferencia de Ta en ese punto tiende a ser mínima  $\Delta Ta = 0,4$ °C.

Respecto a la curva de interpolación se graficó por separado, justamente para poder comparar mejor sus comportamiento, se evidencia que tiene compatibilidad con la serie 2 atribuyendo que tanto la serie 2 como la interpolación oscilan en un rango de Ta similar.

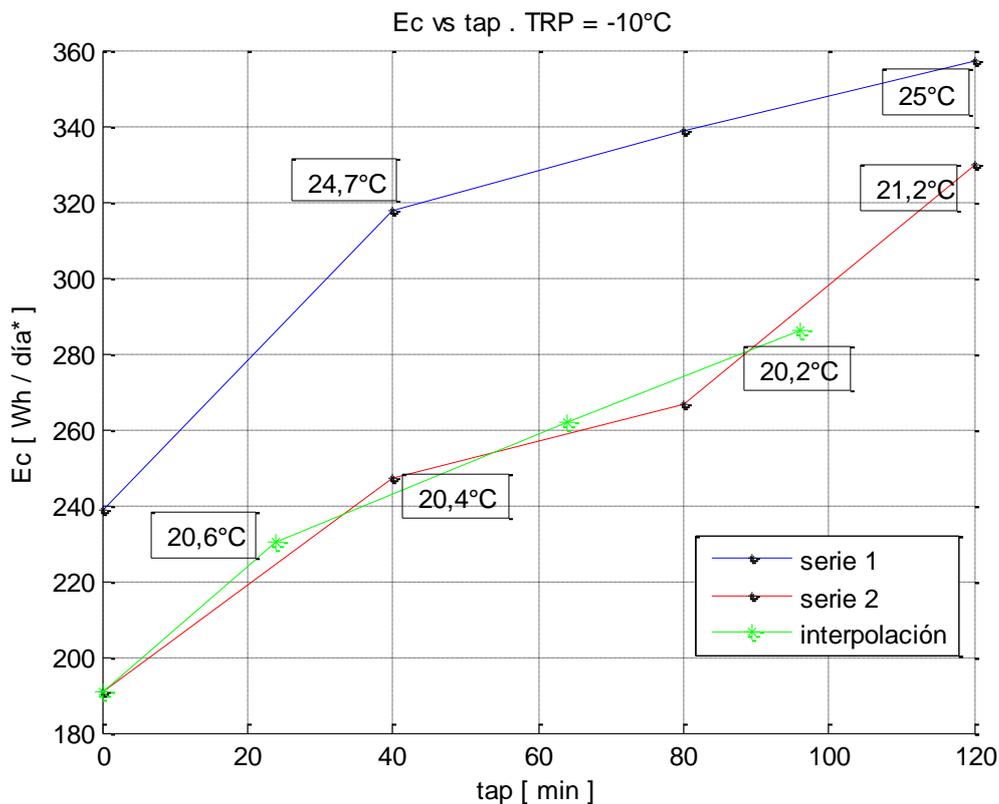


**Figura 5.12. Dependencia de Ec con tap.**

Dependencia de Ec con tap con Trp = -10°C.

La figura 5.12 evidencia que la Ta influye en la variación del consumo energético cuando se tiene apertura. Corroborando lo expuesto en la figura anterior.

Dicho esto se tiene que los cambios de  $E_c$  dependen en gran medida de la temperatura ambiente cuando se tiene apertura del refrigerador, especialmente cuando el refrigerador tiene una apertura mayor a 40 min en el día. Así mismo, se evidenció que entre mayor sea el tiempo de apertura, menor el valor de la  $Trp$  y mayor la  $Cr$  el consumo energético incrementará. Lo cual indica que las variables interactúan entre sí



**Figura 5.13. Dependencia de  $E_c$  con tap.**

.Siendo las razones: la interacción de las variables y los cambios de  $E_c$  proporcionados por la  $T_a$  por las cuales conllevan a la no viabilidad del modelado (6.3) propuesto en un principio.

### 5.3.5. Regresión lineal múltiple.

Por lo anterior se cambia de modelado de regresión polinomial por uno que pueda relacionar las variables por medio de una sola ecuación matemática. El modelo de regresión Lineal múltiple expresado en el capítulo 2.4 permite obtener una ecuación con esa característica.

Teniendo en cuenta que se han establecido relaciones entre las variables con el consumo de energía del sistema, además se identificó que la temperatura ambiente genera fluctuaciones en el consumo de energía. Entonces partiendo desde este punto, se llegó a un modelado por regresión lineal múltiple que contiene las interacciones entre las variables independientes con más influencia, las cuales fueron la Cr y la Trp. Adicionalmente con base en la evidente dependencia de Ec con Ta, de las anteriores pruebas, se adiciono al modelado la temperatura ambiente como variable independiente.

A continuación se presenta el modelado obtenido y la estadística brindada por el programa Minitab 17.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (red)
21,0035	99,22%	99,10%	97,91%

**Tabla 5.4. Resumen del modelo.**

Término contante	Coefficiente	EE del coeficiente	Valor T	Valor P
Contraste	-106,7	45,8	-2,33	0,025
Ta	9,27	1,98	4,69	0,000
Tap	0,4318	0,00842	5,13	0,000
Cr	9,645	0,285	33,87	0,000
Trp	-11,800	0,601	-19,62	0,000
Trp×Trp	0,409	0,114	3,59	0,001
Trp×Cr	-1,2928	0,0446	-28,98	0,000

**Tabla 5.5. Coeficientes primera regresión lineal Múltiple.**

$$Ee = -106,7 + (9,27 \times Ta) + (0,4318 \times tap) + (9,645 \times Cr) - (11,800 \times Trp) + (0,409 \times Trp^2) - (1,2928 \times Trp \times Cr) \quad (6.11)$$

Donde

$Ee$  = Energía estimada por el modelo. [Wh/día\*]

Ta, tap, Cr, Trp son las variables. [°C], [min], [L], [°C] respectivamente.

$Trp^2$  = termino cuadrático.

$Trp \times Cr$  = termino de interacción de primer orden.

Este modelo explica el 91,10% de los datos y los **P** e la tabla 5.5 menor al 0,05 indica que el modelo des significativo y tanto como la constante como cada una de las variables lo es. (Según criterios estadísticos)

Puesto que la energía del fabricante (Ef) está en función de la Trp y de Ta ver anexo A1. Entonces se toma los valores en intervalos intermedios entre 20°C y 25°C, como se muestra en la siguiente tabla.

	Para Trp = -10 °C	Para Trp = 3 °C	Para Trp = 8 °C
Ta [°C]	Energía (Ef) [Wh/día*]	Energía (Ef) [Wh/día*]	Energía (Ef) [Wh/día*]
20-20,9	225	82	49
21-21,9	240	90	56
22-22,9	260	100	60
23-23,9	280	110	70
24-25	311	125	82

**Tabla 5.6. Energía consumida por el fabricante.**

Para verificar el modelo establecido, la ecuación se ajustó con los datos experimentales obtenidos hasta el momento. Con los resultados se comparó el error relativo % de la energía estimada (Ee) y la energía del fabricante (Ef), ambos respecto a Ec. En la siguiente tabla se muestra 14 datos de los 45 que se utilizaron para verificar el modelo. Ver anexo C2.1.

Las pruebas mostradas en las primeras 8 filas de la tabla corresponde a los errores relativos estimados ee% más altos, es decir, donde el modelo mostro menos correspondencia con el sistema, aun así se puede ver que los datos de ee% comparados con los errores relativos del fabricante ee% son menores en las pruebas con carga, siendo esto una capacidad del modelo bastante importante. En los datos donde no tiene buena correspondencia es en las pruebas con 8°C con un error de más del 50% justificado en que el modelado no está debidamente

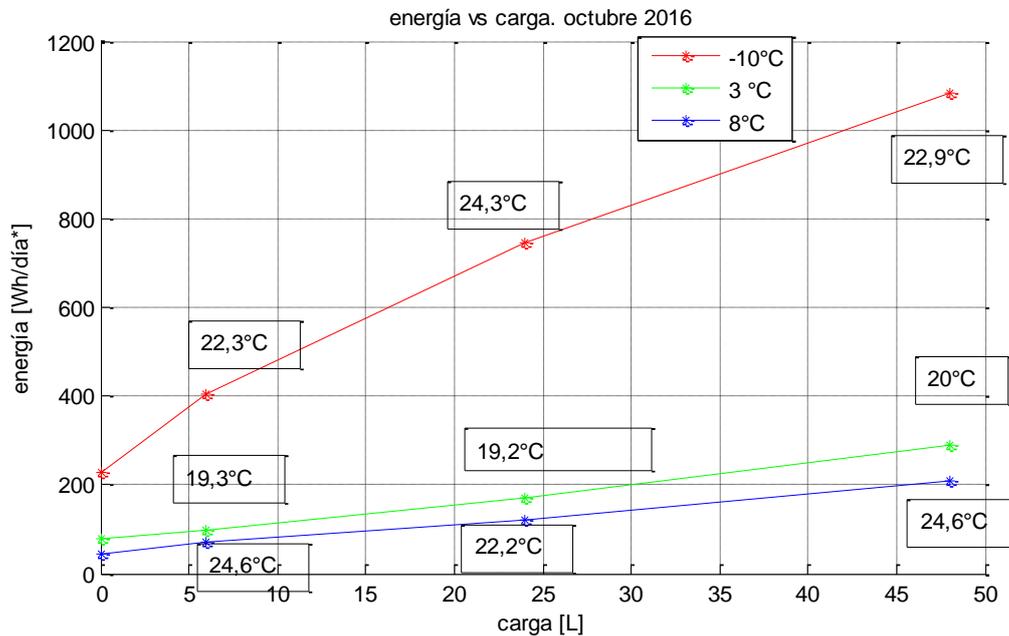
balanceado porque no se han tomado datos con  $Trp = 8^{\circ}\text{C}$  más carga, que son las variables más significativas en el modelado.

Análisis de errores relativos de las energías.								
Trp [ $^{\circ}\text{C}$ ]	tap [min]	Cr [L]	Ta [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Ec [Wh/día*]	Ee [Wh/día*]	ee %	Ef [Wh/día*]	ef %
-10	0	0	25	242,6	284,0	17	311	28
-10	120	0	21,1	333,9	299,6	10	240	28
-10	0	39,6	24,9	1121,4	1176,9	5	311	72
3	80	0	23,9	105,6	117,7	11	110	4
3	120	0	22,3	105,7	120,1	14	100	5
3	0	48	20,5	315,6	328,4	4	82	74
8	0	0	21	41,3	19,7	52	56	36
8	120	0	22,6	71,8	86,4	20	60	16
-10	64	0	20,4	271,5	268,9	1	225	17
-10	0	33,3	24,9	1100,9	1034,7	6	311	72
3	0	42	21	284,9	298,4	5	90	68
3	0	30	22,4	257,3	242,2	6	100	61
8	0	0	25	50,0	56,8	14	82	64
8	80	0	23,3	76,0	75,6	0	70	8

**Tabla 5.7. Comparación de errores.**

En las últimas 6 pruebas se analizan pruebas con errores ee% menores respecto a los errores ef%, en los cuales se observa que la correspondencia del modelo hallado con el sistema se mantiene a lo largo del rango, obteniendo errores relativos ee% por debajo del 15%, determinándose así las propiedades del sistema por medio del modelo, dentro del rango. Siguiendo el mismo análisis se observa la desviación del modelado del fabricante con los datos patrón en todo el rango, evidenciado que hay errores ef% por encima del 60%, lo que demuestra la no correspondencia con el sistema. Lo anterior evidencia que el modelo hallado muestra una correspondencia a lo largo del rango teniendo una desviación en datos con pruebas con  $Trp = 8^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3.6. Balance del sistema.



**Figura 5.14. Dependencia de  $E_c$  con  $C_r$  y  $T_{rp}$ .**

De la figura 5.14 se evidencia que los tres modelos tienen un comportamiento lineal, donde la energía consumida crece de manera proporcional con el aumento de la carga. En cuanto a la curva roja, representa al modelo con  $T_{rp} = -10^\circ\text{C}$ , se observa una pendiente mayor comparado con las otras dos curvas, lo que significa que la interacción de  $T_{rp}$  y  $C_r$  se comportan como sigue: entre menor sea la  $T_{rp}$  y mayor la  $C_r$  produce más carga térmica al refrigerador y por tanto un mayor consumo de energía por el motor. Lo cual se evidencia en el eje vertical, con carga igual a 48 L, en este punto el modelo de la curva roja ( $T_{rp} = -10^\circ\text{C}$ ) consume energía aproximadamente 5 veces más que el modelo de la curva azul ( $T_{rp} = 8^\circ\text{C}$ ).

### Segunda regresión Lineal múltiple.

Para balancear el modelado y que sea más robusto, es decir, que sea afectado en forma mínima por fuentes externas, se añade la corrida de pruebas de la tabla 4.16, las cuales se cambia los valores de  $T_{rp}$  y  $C_r$  para cada prueba.

Se muestra el resultado de la ecuación y la estadística.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (red)
37,0562	98,03%	97,78%	96,27%

**Tabla 5.8. Resumen del modelo.**

Término contante	Coefficiente	EE del coeficiente	Valor T	Valor P
Contraste	-208,0	66,7	-3,12	0,003
Ta	13,50	2,99	4,51	0,000
tap	0,348	0,139	2,50	0,016
Cr	9,453	0,386	24,47	0,000
Trp	-11,481	0,990	-11,60	0,000
Trp×Trp	0,646	0,170	3,79	0,000
Trp×Cr	-0,9732	0,047	-20,53	0,000

**Tabla 5.9. Coeficientes. Segundo modelado de regresión lineal múltiple.**

Ecuación regresión lineal múltiple.

$$Ee = -208,0 + (13,50 \times Ta) + (0,348 \times tap) + (9,453 \times Cr) - (11,481 \times Trp) + (0,646 \times Trp^2) - (0,9732 \times Cr \times Trp) \quad (6.12)$$

Este modelo explica el 97,78% de los datos y el valor **p**, menor al 0,05 indica que el modelo es significativo y tanto como la constante como las variables lo son.

Análisis de errores relativos de las energías.									
#	Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]	Ta [°C]	Ec [Wh/día*]	Ee [Wh/día*]	ee %	Ef [Wh/día*]	ef %
1	-10	40	0	24.7	317,6	318,8	0	311	2
2	-10	0	33	24.9	1100,9	940,7	15	311	72
3	-10	0	0	25	242,6	308,9	27	311	28
4	-10	0	48	22.9	1081,2	1201,4	11	260	76
5	3	64	0	21.4	89,7	74,5	17	90	0

6	3	0	6	22	102,3	99,6	3	100	2
7	3	0	6	19.3	98,7	63,1	36	82	17
8	3	0	42	21	284,9	321,3	13	90	68
9	8	0	0	25	50,0	79,0	58	82	64
10	8	0	24	22.2	120,7	81,2	33	60	50
11	8	80	0	23.1	65,0	81,2	25	70	8
12	8	64	0	22.7	59,7	70,2	18	60	1

**Tabla 5.10. Comparación de errores.**

De 54 datos ver Anexo C.2.2 se sacaron los resultados de las pruebas, tabla 5.10, en ellos se tienen los peores casos para la energía estimada, es decir para datos con errores relativos más altos, es así como se puede ver en las pruebas números 9 y 10 los errores son del 58% y el 33%, esto evidencia que el modelo no corresponde en estas dos condiciones adecuadamente, aunque su error es alto se puede ver que comparado los mismos dos casos con los ef% tienen un error del 64% y 50% respectivamente siendo estos más altos.

El resto de pruebas presentan una correspondencia con el modelo satisfactorio. Por su parte el fabricante tiene buena correspondencia en pruebas con el refrigerador sin carga ( $Cr = 0$  L), lo que indica que el modelo del fabricante no es adecuado para aplicaciones reales.

- **Análisis de la capacidad predictiva del modelado.**

A continuación se va a comprobar la capacidad predictiva del modelado hallado por regresión lineal múltiple ecuación 5.12.

$$Ee = -208,0 + (13,50 \times Ta) + (0,348 \times tap) + (9,453 \times Cr) - (11,481 \times Trp) \\ + (0,646 \times Trp^2) - (0,9732 \times Cr \times Trp)$$

Las pruebas se realizaron en condiciones antes no ejecutadas, donde se varió el tap y la Cr aleatoriamente dentro de los rangos y se varió Trp en los mismos niveles anteriores, tal y como se presenta en la tabla 5.11.

Validación con pruebas experimentales (reales variando dos condiciones)								
Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]	Ta [°C]	Ec [Wh/día*]	Ee [Wh/día*]	ee%	Ef [Wh/día*]	ef %
-10	32	11,4	20,3	534,5	475,3	11	225	58
-10	48	30,6	21,4	899,2	864,1	4	240	73
3	56	14,5	22,7	190,1	184,0	3	100	47
3	56	41	20,9	266,9	332,9	25	82	69
8	72	21,7	20,9	118,5	84,9	28	49	59
8	32	42,3	21,7	156,9	116,2	26	56	64

**Tabla 5.11. Resultados de validación de la segunda regresión lineal múltiple.**

En esta serie de prueba evidencia la predicción del modelo es satisfactoria y el error relativo es menor al 30% que está dentro del error propuesto. Al contrario de los errores del fabricante exceden errores del 70% lo que evidencia que el modelado del fabricante no tiene correspondencia para casos con carga a refrigerar.

Con el resultado de las seis pruebas se validó el modelo en diferentes sectores del rango trabajado, presentando un mejor comportamiento en las pruebas con  $Trp = -10^{\circ}C$ , proporcionando de esta manera un mayor grado de confianza en pruebas donde sea necesario congelar el producto. A diferencia del modelado presentado por el fabricante que en pruebas con volumen de carga y además con aperturas el valor entregado se aleja del comportamiento del sistema, confirmando que el fabricante no proporciona una etiqueta energética fiable para dimensionar un SFVA (y SFV).

#### **5.4.VALIDACIÓN DEL DISEÑO DEL SFVA Y EL MODELADO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.**

En esta prueba de validación primero se buscó asesoría sobre la producción lechera en el departamento, consultando a los profesionales en ganadería del SENA y según sus conocimientos, los pequeños hatos lecheros del departamento del Cauca producen aproximadamente 40 L de leche por día realizando el ordeño dos veces por día, mañana y tarde. Partiendo de esta información se procede a diseñar la prueba que permita validar tanto el diseño del SFVA como el modelado, además de comparar paralelamente los

dimensionamientos partiendo del dato del fabricante  $E_f$ , dato estimado  $E_e$  y el del patrón  $E_c$ .

Las condiciones de la prueba son:

$t_{ap} = 16 \text{ min.}$

$T_{rp} = 3^\circ\text{C.}$

$Cr = 39 \text{ L de agua en botellas pet.}$

$T_a = 21,3^\circ\text{C.}$

Se escogió el parámetro  $t_{ap} = 16\text{min}$  suponiendo que en cada ordeño, al introducir la leche al refrigerador se demora en promedio 8 min. Aunque se introduzca el total de litros de leche en dos tiempos del día diferentes por facilidad se diseña como si se introdujeran la cantidad total de leche una sola vez, para este caso se introducen 39 L de agua, la cual se puede suponer que tienen la misma característica de enfriamiento ya que la leche en su contenido es 90% agua. Además, haciendo un promedio de temperatura ambiente de los últimos tres días se obtiene que  $T_a = 21,3^\circ\text{C.}$

### **Dimensionamiento.**

En las aplicaciones de SFVA donde se electrifica un refrigerador, para realizar el dimensionamiento del SFVA primero se debe determinar el consumo diario de energía. El método general cuando aún no se cuenta con el refrigerador es por medio de la etiqueta energética del refrigerador que proporciona el fabricante. Cuando se cuenta con él, el proceso de determinación es inviable para un proyecto de ingeniería, en términos económicos y tiempo, por tanto también terminan remitiéndose a la etiqueta del fabricante. En consecuencia este aspecto es el tendón de Aquiles en el proceso de dimensionamiento, situación que resalta el presente trabajo de investigación.

Para contextualizar a que se enfrenta un diseñador al dimensionar un SFV que electrifica un refrigerador cuando desea determinar el consumo energético. Se muestra mediante las siguientes tablas la información que entrega el fabricante. Para poder generalizar los resultados de este proyecto se escogieron refrigerador en el mercado variando: las marcas, tipo de refrigerador (horizontal, vertical), diferente corriente de entrada (AC o DC), con características similares, como: su capacidad, la eficiencia que entrega el fabricante este dentro de las más altas (A++ o B).

Refrigerador horizontal DC						
Marca	Eco blue	Enersol		Sunstar	Sun danzer	Pocos
modelo			Br238c4			Fr240mp
Volumen litros	310	230	238	254	216	240
Energía Wh/día*	-	-	-	Rango	Rango	Rango
watt	55	50-120	72	-	-	-

**Tabla 5.12. Etiquetas energéticas para refrigeradores DC horizontales.**

Etiqueta energética del freezer fhocos	
Consumo de energía a 21°C de Ta	104Wh/día* (congelador) 398Wh/día* (refrigerador)
Consumo de energía a 32 °C de Ta	218 Wh/día (congelador) 552 Wh/día (refrigerador)

**Tabla 5.13. Etiqueta energética de la marcha fhocos.**

Refrigerador horizontal AC			
Marca	Challenger	Whirlpool	
Modelo	Ch 322	Wha30abtw	Ecc216ndhw
Volumen litros	200	284	208
Energía Wh/día*	916,6	1448	-
Watt	-	-	155

**Tabla 5.14. Etiqueta energética, refrigeradores AC horizontales.**

Refrigerador Verticales AC				
Volumen litros	229,21	229,21	257,96	240
Energía Wh/día*	1113	1113	1156	419
Watt	-	-	-	-

**Tabla 5.15. Etiqueta energética para refrigeradores AC verticales.**

En las tablas se pueden ver la información energética que necesita el diseñador para dimensionar. Se puede ver que en la tabla 1 unos fabricantes dan solo la potencia y en las demás dan un rango de energías, donde la información más completa la entrega la marca fhocos tabla (5.13). El resto de fabricantes solo entregan un dato de consumo de energía diario que se utiliza para todas las condiciones de uso práctico. Por lo anterior se puede decir que la etiqueta que entrega el fabricante del refrigerador de ésta investigación es la más completa pero como se ha demostrado hasta el momento su información no corresponde con los datos experimentales.

- **Resultado del dimensionamiento**

Se tuvo en cuenta los factores de corrección del acumulador, los dos días de autonomía, el factor contra descarga profunda, el factor por horas de sol aprovechables y factor para protección de cableado, tal cual como se realizó en el capítulo 3.

### **Consumo diario.**

La energía de consumo del fabricante  $E_f$  se obtiene por medio de la etiqueta energética que él ofrece, según las condiciones de esta prueba. A su vez el consumo de energía estimado  $E_e$  se obtuvo reemplazando los datos de las condiciones en el modelado de regresión lineal múltiple 6.12 y por el lado del dato de consumo de energía patrón  $E_c$  se obtuvo por medio del monitoreo de consumo de energía en el laboratorio realizado por el regulador de carga y el color control . Los resultados son:

Datos de refinamiento (Segunda Regresión)								
Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]	Ta [°C]	Ec [Wh/día*]	Ee [Wh/día*]	ee %	Ef [Wh/día*]	ef %
3	16	39	21,3	283,6	311,3	10	125	56

**Tabla 5.16. Resultado de validación. Comparación de errores.**

La predicción del modelado hallado tiene correspondencia con el sistema, por tanto dentro del rango establecido el modelado responde adecuadamente. La correspondencia se manifiesta con la realización de un buen dimensionamiento del SFVA. En cambio con el dato del fabricante se evidencia la no correspondencia con el sistema cuando se introduce carga mayor a 6L, lo que implica que al dimensionar el SFVA genera menos del 50% de la energía

requerida, realizando con esta información un sub dimensionamiento del sistema fotovoltaico y por tanto el no funcionamiento adecuado del sistema de refrigeración.

### **Módulos Fotovoltaicos.**

Caso	Requerimientos
Fabricante	33,8 Vmp, 162,2 Wp
Estimado (modelado)	33,8 Vmp, 406,3 Wp
Patrón (referencia)	33,8 Vmp, 369,7 Wp

**Tabla 5.17. Comparación de módulos FV.**

La potencia de generación del arreglo fotovoltaico para que el refrigerador funcione correctamente es 369,7 Wp. Por su parte el modulo fotovoltaico dimensionado con base al dato del fabricante proporciona 162,2 Wp. Lo que indica que la generación energética por el fabricante proporciona menos del 50% de la potencia requerida para que el refrigerador opere en el día. La insuficiente energía que genera el arreglo fotovoltaico repercute en un abastecimiento inadecuado en el acumulador en horas de sol, lo que impide que se cargue y también en que el refrigerador no funcione adecuadamente. En comparación del arreglo de módulos fotovoltaicos dimensionado con base al dato de energía proporcionado por el modelo que genera adecuadamente proporcionando energía durante todo el día, cargando el acumulador en horas de sol y proporcionando energía al refrigerador cuando este la necesite. Además en Popayán donde el porcentaje de humedad y la nubosidad en ciertos momentos del día son altos [15] es conveniente dimensionar con mínimo un día de autonomía garantizando al usuario un correcto funcionamiento del sistema. Con el dato del fabricante en la práctica el sistema no tendría día de autonomía debido a su baja generación de energía lo que implica problemas de abastecimiento energético en días con nubosidad alta.

### **Acumuladores.**

Los acumuladores requeridos para cada sistema son:

Caso	Requerimientos
Fabricante	24 V , 19,34 Ah
Estimado	24 V , 48 Ah
Patrón (referencia)	24 V , 43 Ah

**Tabla 5.18. Comparación de acumuladores.**

La tabla 5.18 presenta que, para el dato del fabricante respecto al dato de patrón el acumulador está sub dimensionado por debajo del 50% de la capacidad que debería tener para satisfacer la demanda energética del refrigerador. Al ser la capacidad del acumulador inferior a la requerida solo podría proporcionar energía al refrigerador por el primer día que el acumulador está completamente cargado, después no proporcionará la energía que necesite el refrigerador en horas de no generación o en momentos donde la demanda energética supere a la que genera el modulo en horas de sol. El SFVA cuando el acumulador está descargado, por función del regulador se desconecta el refrigerador (con las implicaciones en la conservación de los alimentos), para que la energía de generación por el módulo cargue el acumulador. El proceso anterior se repite en el tiempo, lo que implica una constante carga y descarga del acumulador y una constante interrupción de la cadena de frio de los alimentos, ocasionando que la vida útil del acumulador disminuya drásticamente y que los productos se dañen. Por otro lado, el acumulador estimado está ligeramente sobredimensionado permitiendo que el SFVA tenga más autonomía pero no la suficiente para entrar en sobre costos.

### **Regulador de carga.**

Caso	Requerimientos
Fabricante	24 V , 6,3 A
Estimado	24 V , 13,2
Patrón (referencia)	24 V , 12,0 A

**Tabla 5.19. Comparación de reguladores de carga.**

Cómo se ha evidenciado antes, el dimensionamiento del SFVA con el dato del fabricante, tiene deficiencia en el abastecimiento energético. Para superar este inconveniente el usuario lo primero que hace es beneficiarse de la característica de modularidad de estos sistemas y pensar en aumentar la capacidad de generación aumentando el arreglo de módulos

fotovoltaicos, con el propósito de suplir la demanda energética del refrigerador antes no resuelta, pero sin modificar los demás componentes aparenta ser una buena solución. Esta solución genera inconvenientes debido a que al aumentar el arreglo fotovoltaico manteniendo el mismo voltaje nominal implica que aumenta la corriente, este hecho superaría fácilmente la corriente máxima que soporta el regulador incurriendo en daño del dispositivo y por tanto del SFVA.

### Cableado y Breaker

Caso	Requerimientos
Fabricante	6,3 A
Estimado	13,2 A
Patrón (referencia)	12,0 A

**Tabla 5.20. Comparación de protecciones y cableado.**

En la situación expuesta en el análisis anterior también afectaría el cableado, debido a que el exceso de corriente en un cable produce efecto de calentamiento por disipación de energía, cuando esta supera ciertos límites el calor daña los equipos del SFVA.

Como se evidenció en este proceso, un incorrecto dimensionamiento causado por un valor erróneo de energía entregado por el fabricante origina problemas ingenieriles, social y económico. Teniendo presente que una potencial aplicación de estos sistemas es en zonas rurales donde su acceso es limitado debido a sus condiciones topográficas. Un dimensionamiento incorrecto del SFVA como el evidenciado con el dato de energía entregado por el fabricante, causa errores que no solo repercute en una inadecuada electrificación del refrigerador. El funcionamiento de cada componente del sistema es fundamental y cada uno tiene sus condiciones de operación donde en un caso de sub dimensionamiento no son cumplidas como en el acumulador que es sometido a cargas y descargas agotando su vida útil, en el regulador, el cableado y protecciones en ciertas circunstancias pueden llegar a dañarse por sobre corriente y dado que cada componente incide de manera decisiva en el uso final estos factores provoca que el sistema no cumpla su función y por tanto afecte en la economía del productor al no refrigerar los alimentos

adecuadamente induciendo a daño de los mismos atentando de esta manera con la salud de los consumidores de estos productos.

Además del problema que tiene un los usuarios de estas zonas ante el daño de un componente que no tienen la facilidad de trasladarse por la compra de un equipo sin contar que si no tienen la capacidad técnica para instalarlo tienen que contratar el servicio técnico. Situación que en ocasiones hacen desistir al productor y por tanto dejar en abandono el sistema. Lo que afecta a la fiabilidad y obstruyendo su expansión para dar soluciones a problemas energéticos. Por lo anterior se evidencia la necesidad de obtener un correcto dato de consumo energético del refrigerador acorde a las condiciones de uso, siendo el modelo matemático hallado una herramienta que mejora el dimensionamiento de SFVA con aplicación en refrigeradores.

## 6. CONCLUSIONES.

Se demuestra que la etiqueta energética entregada por el fabricante no es suficiente para el cálculo del dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos por lo que se debe tener en cuenta más variables como Cr, tap (Trp y Ta para ciertos fabricantes) para entregar una etiqueta energética más precisa.

En condiciones con carga mayores a 6 L, la ecuación matemática experimental entrega valores de energía (consumida por el refrigerador dc) con errores relativos entre 2% y 33% con respecto al valor de energía real, siendo el error máximo (33%) inferior al error que proporciona el fabricante, el cual entrega errores relativos con un mínimo de 35% hasta un máximo del 76% respecto al valor de energía real. De lo anterior, en condiciones de uso práctico, es decir, con carga, el modelado experimental matemático hallado entrega valores de energía más precisos permitiendo mejorar el dimensionamiento de SFVA (SFV) que electrifiquen un refrigerador, atribuyéndole mayor fiabilidad.

El dimensionamiento de un SFV se realiza en función del mes más desfavorable, en aplicaciones con refrigerador, además se debe considerar el mes con mayor carga térmica el cual corresponde al que presente mayor temperatura ambiente promedio. Por ejemplo en Popayán se debe dimensionar para el mes de agosto, donde presentó una  $\overline{T_a} = 24,7^\circ\text{C}$  bajo sombra.

Con un adecuado dimensionamiento del sistema fotovoltaico se puede electrificar correctamente un sistema de refrigerador el cual funciona con un motor dc, satisfaciendo los picos de potencia que el motor demande.

En las pruebas de error dinámico se determinó que el  $\Delta T_i$  es aproximadamente  $6^\circ\text{C}$ . De lo anterior se encontró que la temperatura de los productos a refrigerar puede oscilar dentro de un rango de  $T_{rp} \pm 6^\circ\text{C}$ , pero no necesariamente en la temperatura de programación ( $T_{rp}$ ).

Las variables estudiadas que tiene mayor peso para determinar el consumo energético en un sistema de refrigeración dc son la temperatura de programación y la carga (o producto) a refrigerar. En las cuales, la  $E_c$  tiene una dependencia inversamente proporcional

representada por una función polinomial de segundo orden y la segunda una dependencia directamente proporcional representada por una función polinomial de primer orden, respectivamente.

El modelado hallado se puede aplicar para sistemas de refrigeración homólogos al estudiado, debido a que cuentan con similares características de consumo energético.

Se logra una primera aproximación para el desarrollo de herramientas que mejoren el diseño de sistemas fotovoltaicos que garanticen su correcto funcionamiento, lo que permite brindar estabilidad a los sistemas de refrigeración por energía fotovoltaica. Logrando con esto que el SFVA sea una solución técnica, ambiental, social económica y productiva. Teniendo una relación costo beneficio viable a la implementación.

## 7. ANEXOS.

### ANEXOS A. ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS.

#### A.1. Ficha técnica del refrigerador DC por compresión, marca Steca

#### Propiedades eléctricas

Steca PF 166/PF 240		
Tensión del sistema	12 V	24 V
Rango de tensión de entrada	10 V a 17 V	17 V a 31,5 V
Protección contra descarga profunda	10,4 V	22,8 V
Umbral de reconexión automática	11,7 V	24,2 V
Consumo de energía	40 – 100 W	
Fusible recomendado	15 A	7,5 A

#### Propiedades generales

	Steca PF 166	Steca PF 240
Clase de eficiencia energética	A++	
Técnica de refrigeración	compresor	
Modo de ahorro de energía automático	si	
Control de rpm con optimización energética	Regulación digital y electrónica completa	
Configurable	si	
Display	visualización digital de temperatura en la tapa	
Unidad de temperatura (grados Celsius / Fahrenheit)	ajustable	
Brillo del display	ajustable	
Volumen neto de refrigeración	166 litros   5,9 ft <sup>3</sup>	240 litros   8,5 ft <sup>3</sup>
Función de frigorífico o congelador	ajustable	
Temperatura interior ajustable	si	
Rango de temperatura de frigorífico	2 °C   36 °F – 12 °C   54 °F	
Rango de temperatura de congelador	-20 °C   -4 °F – -10 °C   14 °F	
Rango de temperatura ambiente	10 °C   50 °F – 43 °C   109 °F	
Cestas colgables	2	
Bandejas de congelado	3	
Cerradura	si	
Acumulador de frío	1	
Dimensiones exteriores A x B x C	91,7 x 87,2 x 70,9 cm 36.1 x 34.3 x 27.9 inch	91,9 x 128,8 x 76 cm 36.2 x 50.7 x 29.9 inch
Peso	47 kg   104 lbs	62 kg   137 lbs

Steca PF 240					
Temperatura ambiente	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
Temperatura interior +8 °C	49 Wh / al día	82 Wh / al día	125 Wh / al día	183 Wh / al día	256 Wh / al día
Temperatura interior +3 °C	82 Wh / al día	125 Wh / al día	183 Wh / al día	256 Wh / al día	351 Wh / al día
Temperatura interior -10 °C	225 Wh / al día	311 Wh / al día	421 Wh / al día	561 Wh / al día	739 Wh / al día
Temperatura interior -20 °C	421 Wh / al día	561 Wh / al día	739 Wh / al día	964 Wh / al día	1246 Wh / al día

## ANEXOS B. ALGORITMO.

### B.1. Algoritmo en *Matlab*<sup>®</sup>.

Se implementa el siguiente algoritmo que permita que a partir de las mediciones de la corriente en el refrigerador y el voltaje en el acumulador, realizadas por el regulador de carga Victron Energy, permitiera hallar la energía consumida por el refrigerador por un día, por medio de la ecuación 4.2.

```
% Cálculo de la energía consumida por el refrigerador.
clc; clear all; close;
%% -----*se cargan los datos y se asignan a una variable*-----
    load Octubre13_t.txt
    load Octubre13_lc.txt
    load Octubre13_Vb.txt
t=    Octubre13_t ;
tCon=    floor(t)+(t-floor(t))/0.6 ; % Resescalar el tiempo.
I_carga=    Octubre13_lc ;
V_bateria = Octubre13_Vb ;
cri=    6 ; % Criterio personal para eliminar ruido.

%%--*** SE QUIERE HALLAR EL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA CARGA ***-----
-
P_c = V_bateria.*I_carga ; % potenciade consumo de carga.
P_cc = (P_c>cri) ; % potencia > cri.
P_c = P_c.*P_cc ; % potencia .

%% ** Determinar visualmente el primer y el último flanco.
plot(tCon,P_c,'b') % se grafica corriente(quitando el ruido) vs tiempo
xlabel('tiempo [H]')
ylabel('potencia [A]')
title('Consumo de carga- Potencia vs tiempo')
set(gca,'XTick',0:25)
grid on

%% ** consumo promedio en el día**
sP_c = sum(P_c) ;
P_c2 = sum (P_cc) ; % # de datos
pP_c = sP_c/P_c2 ; % Potencia promedio [W]
fprintf('* El consumo promedio de potencia de la carga tomando los datos
\n de consumo durante el día es %3.2f W \n ',pP_c)

%% ** tiempo que pide potencia el refrigerador en el día**
% energía consumida
inP_c= find ( diff(P_cc)~=0) ;
idt = tCon(inP_c) ; % flancos.
```

```
didt = diff (idt) ; % se haya el ancho de pulso.
st= floor(didt)*60+(didt-floor(didt))*60 ;
s=sum(st(1:2:end)) ; % tiempo de consumo en minutos
h_e= s/60 ; % tiempo de consumo en horas.
sm = floor(h_e)+ (h_e-floor(h_e))*0.6 ;
fprintf('* El tiempo de consumo promedio de potencia de la carga tomando los
datos\n
de consumo durante el día es %3.2f Horas \n ',sm)
E = h_e*pP_c ; [Wh / día* ]
fprintf('* La energía consumida durante el día por la \n carga es %3.3f Wh/día \n ',E)
```

## ANEXO C. RESULTADOS.

### C.1. Resultados.

#### Resultados de las pruebas, tabla 4.10

Agosto 2016								
prueba	Condiciones			t [ h ]	Potencia promedio [ W ]	Ec [ Wh/día* ]	Ta [ °C ]	Ti [ °C ]
	Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]					
1	-10	0	0	5.41	35,2	200,2	20,1	
2	-10	40	0	7.05	35,1	248,3	20,4	-9,6
3	-10	80	0	7.50	35,5	278,3	20,1	-8,8
4	-10	120	0	9.17	35,97	333,9	21,2	-8,5
5	3	0	0	1.43	38,9	66,8	20	
6	3	40	0	2.16	40,5	91,8	22,2	4,7
7	3	80	0	2.29	39,3	97,5	21,9	4,2
8	3	120	0	2.37	40,4	105,7	22,3	3,8
9	8	0	0	1.05	38,1	41,3	20	
10	8	40	0	1.22	39,8	54,4	21,7	8,7
11	8	80	0	1.35	41,0	65,0	23,1	8,41,35
12	8	120	0	1.43	40,7	69,9	22	8,2
						promedio	24,7	

#### Resultados de las pruebas, tabla 4.14.

2017 Interpolación.								
prueba	condiciones			t [ h ]	Potencia promedio [ W ]	Ec [ Wh/día* ]	Ta [ °C ]	Ti [ °C ]
	Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]					
1	-10	24	0	6,54	35,2	242,9	20,6	-9,4
2	-10	64	0	7,41	35,3	271,5	20,4	-8,7
3	-10	96	0	8,03	35,63	286,8	20,2	-9,1

4	3	24	0	2,07	40,36	83,4	22	3,7
5	3	64	0	2,16	39,6	89,7	21,4	4,6
6	3	96	0	2,31	40,3	101,5	21,6	4,3
7	8	24	0	1,17	38,66	49,6	21,3	8,5
8	8	64	0	1,3	39,8	59,7	22,7	8,6
9	8	96	0	1,35	40,2	63,6	22,2	8,5

## C.2. Resultados de las pruebas de regresión.

### C2.1. Resultados primera regresión. Datos hallados por la ecuación 6.11

Resultados Primera regresión									
#	Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]	Ta [°C]	Ec [Wh/día*]	Ee [Wh/día*]	ee %	Ef [Wh/día*]	ef %
1	-10	0	0	25	242,6	284,0	17	311	28
2	-10	0	0	20	200,2	237,6	19	225	12
3	-10	24	0	20,6	242,9	253,5	4	225	7
4	-10	40	0	24,7	317,6	298,4	6	311	2
5	-10	40	0	20,4	248,3	258,6	4	225	9
6	-10	64	0	20,4	271,5	268,9	1	225	17
7	-10	80	0	25,1	338,7	319,4	6	311	8
8	-10	80	0	20,1	278,3	273,1	2	225	19
9	-10	96	0	20,2	268,8	280,9	4	225	16
10	-10	120	0	25	357,1	335,8	6	311	13
11	-10	120	0	21,1	333,9	299,6	10	240	28
12	-10	0	33,3	24,9	1100,9	1034,7	6	311	72
13	-10	0	39,6	24,9	1121,4	1176,9	5	311	72
14	3	0	0	24,9	91,1	92,4	1	125	37
15	3	0	0	22	66,8	65,5	2	100	50
16	3	24	0	22	83,4	75,9	9	100	20
17	3	40	0	25,2	117,1	112,5	4	125	7

18	3	40	0	22,4	91,9	86,5	6	100	9
19	3	64	0	21,4	89,7	87,6	2	90	0
20	3	80	0	24,5	119,9	123,2	3	125	4
21	3	80	0	20,5	92,6	86,2	7	82	11
22	3	80	0	21,9	97,6	99,1	2	90	8
23	3	80	0	23,9	105,6	117,7	11	110	4
24	3	96	0	21,6	101,5	103,3	2	90	11
25	3	120	0	26,4	143,3	158,1	10	125	13
26	3	120	0	22,3	105,7	120,1	14	100	5
27	3	0	6	22	102,3	100,1	2	100	2
28	3	0	12	21,2	139,0	127,3	8	90	35
29	3	0	18	20,7	172,3	157,3	9	82	52
30	3	0	24	22,8	202,3	211,3	4	100	51
31	3	0	30	22,4	257,3	242,2	6	100	61
32	3	0	36	22	288,2	273,1	5	100	65
33	3	0	42	21	284,9	298,4	5	90	68
34	3	0	48	20,5	315,6	328,4	4	82	74
35	8	0	0	21	41,3	19,7	52	56	36
36	8	0	0	25	50,0	56,8	14	82	64
37	8	24	0	21,3	49,6	32,9	34	56	13
38	8	40	0	24,4	73,1	68,5	6	82	12
39	8	40	0	21,7	54,4	43,5	20	56	3
40	8	64	0	22,7	59,7	63,1	6	60	1
41	8	80	0	23,3	76,0	75,6	0	70	8
42	8	80	0	23,1	65,0	73,8	14	70	8
43	8	96	0	22,2	63,6	72,3	14	60	6
44	8	120	0	22,6	71,8	86,4	20	60	16
45	8	120	0	22	69,9	80,8	16	60	14

**C2.2. Resultados de comparación de errores. Sistema balanceado. Hallados con la ecuación 6.12.**

Pruebas para refinamiento segunda modelado								
Trp [°C]	tap [min]	Cr [L]	Ta [°C]	Ec [Wh/día*]	Ee [Wh/día*]	ee %	Ef [Wh/día*]	ef %
-10	0	0	25	242,6	308,9	27	311	28
-10	0	0	20	200,2	241,4	21	225	12
-10	24	0	20.6	242,9	257,9	6	225	7
-10	40	0	24.7	317,6	318,8	0	311	2
-10	40	0	20.4	248,3	260,7	5	225	9
-10	64	0	20.4	271,5	269,1	1	225	17
-10	80	0	25.1	338,7	338,1	0	311	8
-10	80	0	20.1	278,3	270,6	3	225	19
-10	96	0	20.2	268,8	277,5	3	225	16
-10	120	0	25	357,1	350,7	2	311	13
-10	120	0	21.1	333,9	298,0	11	240	28
-10	0	33	24.9	1100,9	940,7	15	311	72
-10	0	40	24.9	1121,4	959,9	14	311	72
-10	0	6	22.3	405,9	387,6	5	260	36
-10	0	24	24.2	744,7	758,6	2	311	58
-10	0	48	22.9	1081,2	1201,4	11	260	76
3	0	0	24.9	91,1	99,5	9	125	37
3	0	0	22	66,8	60,4	10	100	50
3	24	0	22	83,4	68,7	18	100	20
3	40	0	25.2	117,1	117,5	0	125	7
3	40	0	22.4	91,9	79,7	13	100	9
3	64	0	21.4	89,7	74,5	17	90	0
3	80	0	24.5	119,9	122,0	2	125	4
3	80	0	20.5	92,6	68,0	27	82	11
3	80	0	21.9	97,6	86,9	11	90	8
3	80	0	23.9	105,6	113,9	8	110	4
3	96	0	21.6	101,5	88,4	13	90	11

3	120	0	26.4	143,3	161,5	13	125	13
3	120	0	22.3	105,7	106,2	0	100	5
3	0	6	19.3	98,7	63,1	36	82	17
3	0	6	22	102,3	99,6	3	100	2
3	0	12	21.2	139,0	128,0	8	90	35
3	0	18	20.7	172,3	160,4	7	87	50
3	0	24	20.5	217,2	196,9	9	87	60
3	0	24	22.8	202,3	228,0	13	100	51
3	0	30	22.4	257,3	261,8	2	100	61
3	0	36	22	288,2	295,6	3	100	65
3	0	42	21	284,9	321,3	13	90	68
3	0	48	24.1	375,7	402,3	7	125	67
3	0	48	20.5	315,6	353,7	12	82	74
8	0	0	21	41,3	25,0	39	56	36
8	0	0	25	50,0	79,0	58	82	64
8	24	0	21.3	49,6	37,4	25	56	13
8	40	0	24.4	73,1	84,8	16	82	12
8	40	0	21.7	54,4	48,4	11	56	3
8	64	0	22.7	59,7	70,2	18	60	1
8	80	0	23.3	76,0	83,9	10	70	8
8	80	0	23.1	65,0	81,2	25	70	8
8	96	0	22.2	63,6	74,6	17	60	6
8	120	0	22.6	71,8	88,4	23	60	16
8	120	0	22	69,9	80,3	15	60	14
8	0	6	24.6	72,7	83,6	15	82	13
8	0	24	22.2	120,7	81,2	33	60	50
8	0	48	24.8	207,5	156,3	25	82	60

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. UPME. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. [Internet]. Bogotá; 2015. [Citado 07 nov 2017]. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf).
- [2]. Díaz Pablo. Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: aplicación a la electrificación rural. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- [3]. Joseph C., et al. Evaluación del desempeño de sistemas fotovoltaicos autónomos en zonas rurales de la provincia de corriente, Argentina. IV congreso Brasileiro de energía e V conferencia latino-americana da ISES, Brasil. 2012.
- [4]. Anish M, Anirban C, Bhavesh V. Performance analysis of a solar photovoltaic operated domestic refrigerator. Elsevier, 2009.
- [5]. Fernandez Luis. Hacia un paradigma de electrificación rural descentralizada con sistemas fotovoltaicos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [6]. Giuseppe M., Grasso D. Remote monitoring system stand alone photovoltaic power plants: The case study of PV- powered outdoor refrigerator. Elsevier, 2013.
- [7]. (Ministerio Colombia). Guía de presentación de proyectos de energía y gas. UPME. Bogotá, 2013.
- [8]. UPME. Cartilla guía formulación y presentación de proyectos fondos FAER, FAZNI, SGR, FCF y programa PRONE, UPME, 2011.
- [9]. Colecciones nuevas tecnologías. Energía solar fotovoltaica. Marcombo S.A.Barcelona,1986.

- [10]. Anónimo. (2016) ¿Cómo funcionan los reguladores de carga solares PWM y MPPT?. Junio de 2017, de Monosolar Recuperado de: <https://www.monsolar.com/blog/como-funcionan-los-reguladores-de-carga-solares-pwm-y-mppt/>
- [11]. Edward G. Ptia. Principios y sistemas de refrigeración. Limusa, S.A Mexico DF, 2005.
- [12]. Chapra S., Canale R. Métodos numéricos para ingenieros. Mc Graw Hill/Interamericana Editores S:A. DE C.V. Mexico DF, 2007.
- [13]. Douglas C. Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. Limusa Wiley. Mexico DF, 2005.
- [14]. IDEAM Colomiba. Radiación global solar horizontal medio diaria solar . [Internet], Bogotá. [citado 07 nov 2017]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/RadiacionSolar13.pdf>.
- [15]. IDEAM Colomiba. Distribución del brillo solar medio diario anual. [Internet], Bogotá. [citado 07 nov 2017]. Disponible en: [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Brillo\\_Solar\\_13.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Brillo_Solar_13.pdf).
- [16]. Gaviria C., Astaiza C, Montaña R. Diseño de un equipo autónomo para determinar índices de producción de energía fotovoltaica a partir de variables climatológicas y espectros de radiación. Trabajo de grado. Universidad del Cauca. 2017