



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA  
ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACUMULADOR PARA  
AGUA SANITARIA CON MONITOREO DE DEFORMACIONES  
Y TEMPERATURA CON CAPACIDAD DE 140 LITROS A 200  
PSI BAJO NORMAS ASME PARA EL DECEM**

**AUTORES:**

**TAMAYO VEGAS, ADRIANA VALERIA**

**TANA VÁSQUEZ, ALEJANDRO GANDHI**

**DIRECTOR: ING. CARRIÓN, LUIS**

**Sangolquí – Ecuador**

**2016**



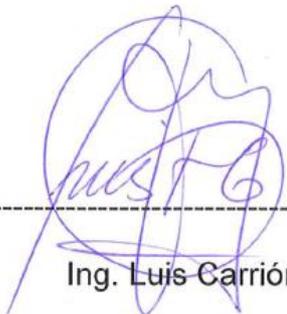
## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### CERTIFICACIÓN DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACUMULADOR PARA AGUA SANITARIA CON MONITOREO DE DEFORMACIONES Y TEMPERATURA CON CAPACIDAD DE 140 LITROS A 200 PSI BAJO NORMAS ASME PARA EL DECEM” ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores Adriana Valeria Tamayo Vegas y Alejandro Gandhi Tana Vásquez para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 17 de diciembre del 2015**



Ing. Luis Carrión.  
DIRECTOR



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Adriana Valeria Tamayo Vegas, con cédula de identidad N° 1600650574 y Alejandro Gandhi Tana Vásquez, con cédula de identidad N° 0502396740 declaramos que el proyecto de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACUMULADOR PARA AGUA SANITARIA CON MONITOREO HÍBRIDO DE DEFORMACIONES Y TEMPERATURA CON CAPACIDAD DE 140 LITROS A 200 PSI BAJO NORMAS ASME PARA EL DECEM" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 17 de diciembre del 2015**



Srta. Adriana Valeria Tamayo Vegas

C.C 1600650574



Sr. Alejandro Gandhi Tana Vásquez

C.C 0502396740



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORIZACIÓN

Yo, Adriana Valeria Tamayo Vegas y Alejandro Gandhi Tana Vásquez autorizamos a la Universidad Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACUMULADOR PARA AGUA SANITARIA CON MONITOREO HÍBRIDO DE DEFORMACIONES Y TEMPERATURA CON CAPACIDAD DE 140 LITROS A 200 PSI BAJO NORMAS ASME PARA EL DECEM” , cuyo contenido , ideas y criterios son de nuestra exclusiva autoría y responsabilidad

**Sangolquí, 17 de diciembre del 2015**

Srta. Adriana Valeria Tamayo Vegas

C.C 1600650574

Sr. Alejandro Gandhi Tana Vásquez

C.C 0502396740

## **DEDICATORIA**

El gran esfuerzo forjado en la vida tiene su recompensa, este gran camino lleno de obstáculos, adversidades, lágrimas y felicidad, me hizo llegar a mi meta más anhelada, este gran triunfo le dedico primeramente a mis padres que con su gran esfuerzo me han sabido enseñar a luchar contra todo y me dejaron la mejor herencia que un padre puede dejar a un hijo la educación, inmensamente te dedico a ti mi Kelly , mi pequeña luz que vino a mi vida justo a iluminarme para seguir por el camino del bien , a ti Julián que me has apoyado en las buenas y en las malas y has sabido ser más que mi novio mi amigo y confidente , a mis hermanos que me dieron todo su apoyo siempre . Agradezco a Dios que con su ayuda divina me ayudo a cumplir mis sueños.

**Adriana Valeria Tamayo Vegas**

## DEDICATORIA

Sólo una pequeña minoría se atreve a creer que lo imposible tiene solución. Son los que comienzan a escalar la montaña, aunque en el momento no tengan ni idea de cómo conquistarán la cima. Y generalmente son esos los que terminan coronando la altura (A.L. Minis). Esta frase se asemeja a la culminación de un ciclo importante y grato en mi vida, como finalizar la carrera universitaria, ha sido una escalada de auto superación.

Dedico este proyecto de grado a mi querida madre por ser mi ejemplo, mi balanza, mi punto de partida. A mi abuelo por ser imagen de lucha, y hermana por ser imagen de triunfo, a ellos gracias por su apoyo incondicional en momentos de desfallecimiento, han sido un pilar fundamental. A Dios por ser mi paz, mi fe, mi todo.

**Alejandro Gandhi Tana Vásquez**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a los grandes Ingenieros que me educaron a lo largo de toda mi carrera universitaria, al Ing. Luis Carrión porque fue un gran guía para la elaboración del proyecto, a los Ingenieros Lenin Abatta y José Guasumba ya que de ellos nació la idea del proyecto, a mi compañero Alejandro Tana porque juntos logramos culminar este gran sueño, a mis amigos, familiares y sobre todo a Dios que siempre ha cuidado mis pasos.

**Adriana Valeria Tamayo Vegas**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en la vida.

Este proyecto de grado es el resultado del esfuerzo conjunto. Por lo que agradezco a mi director de proyecto Ing. Luis Carrión, por su generosidad al brindarnos la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia en un marco de confianza y amistad, mi compañera Valeria Tamayo por creer en este proyecto que comenzó como sueño y ahora es un realidad.

Agradezco al Ing. Lenin Abatta quien con su conocimiento apporto para la finalización del proyectó.

Merecen también agradecimientos familiares y amigos por su confianza, franco apoyo y carisma durante la elaboración de este proyecto gracias totales.

**Alejandro Gandhi Tana Vásquez**

## INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
CAPITULO 1.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Definición del problema .....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos.....	2
1.4 Alcance.....	3
1.5 Justificación e importancia del proyecto.....	3
CAPÍTULO II.....	5
2.1 Conceptos básicos de energía solar .....	5
2.2 Conceptos básicos de transmisión de calor .....	7
2.2.1 Transmisión del calor .....	8
2.2.2 Transmisión de calor por conducción.....	9
2.2.3 Transmisión de calor por convección.....	13
2.2.4 Transmisión de calor por radiación .....	18
2.3 Instalaciones solares térmicas .....	18
2.3.1 Agua caliente sanitaria (ACS) .....	19
2.4 Sistema de Acumulación en las instalaciones solares .....	19
2.4.1 Acumuladores de agua caliente sanitaria (ACS) .....	20
2.4.2 Acumuladores de Inercia .....	22
2.5 Materiales de los ACS .....	23
2.5.1 Acumuladores de Resinas epoxídicas .....	23
2.5.2 Acumuladores de Acero Negro .....	24
2.5.3 Acumuladores Vitrificados.....	24
2.5.4 Acumuladores de Acero inoxidable.....	25
2.6 Aspectos de diseño y funcionamiento de los acumuladores .....	25

2.6.1 Estratificación de temperaturas:.....	25
2.6.2 Mezcla .....	26
2.6.3 Dispositivo de Estratificación de carga térmica .....	26
2.7 Aislamiento térmico.....	27
2.7.1 Materiales Aislantes:.....	28
2.9 Incrustación .....	31
2.10 Normas Aplicables .....	32
2.10.1 Historia Código ASME .....	32
2.10.2 Alcance código ASME División 1 .....	33
2.10.3 Limitaciones de la división 1.....	34
2.10.4 Formulación Recipientes a presión .....	34
2.11 Mecánica de Materiales .....	41
2.11.1 Tensión:.....	41
2.11.2 Deformación .....	42
2.11.2.1 Deformación Unitaria. ....	42
2.11.3 Ley de Hooke.....	42
2.11.4 Coeficiente de Poisson .....	43
2.11.5 Cilindro de pared delgada.....	44
2.11.5.1 Esfuerzos en un cilindro de pared delgada .....	44
2.11.7 Medida de deformación galgas extensiométricas.....	48
Galgas cementadas:.....	48
Galgas sin cementar:.....	48
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>49</b>
3.1 Procedimiento de cálculo .....	49
3.1.2 Diseño mecánico .....	51
3.1.3 Diseño térmico.....	56
3.1.3.1 Configuración básica del circuito de circulación .....	56
3.1.3.2 Selección aislante térmico del acumulador de acs .....	56
3.1.3.5 Intensidad radiante .....	64
3.1.3.6 Calor máximo cedido al ambiente .....	64
3.1.3.7 Determinación caudal del captador solar .....	65
3.1.3.8 Pérdidas de calor desde el acumulador hacia el ambiente.....	65
3.1.4.3 Pérdidas de calor tuberías de conexión .....	72
<b>CAPITULO IV.....</b>	<b>77</b>

4.1 Diseño sistema monitoreo.....	77
4.2 Selección sensores.....	78
4.2.1 Sensores de temperatura.....	78
4.4.2 Sensores de deformaciones .....	81
4.5 Acondicionamiento de señal .....	83
4.5.1 Acondicionamiento galgas extensiométrica.....	83
4.5.2 Acondicionamiento Termocupla .....	85
4.6 Adquisición de datos.....	86
4.7 Sistema de visualización.....	89
4.8 Dimensionamiento sistema fotovoltaico .....	90
4.8.1 Dimensionamiento panel.....	90
4.8.2 Cálculo del número y la capacidad de las baterías .....	91
4.9 Diagrama conexión sistema.....	93
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>94</b>
5.1 Proceso de construcción.....	94
5.1.1 Diagrama construcción Cuerpo Acumulador .....	95
5.1.2 Diagrama construcción Cabeza Acumulador.....	96
5.1.3 Diagrama Ensamble Acumulador.....	97
5.1.4 Diagrama Fabricación Carcaza de Protección Cuerpo.....	98
5.1.5 Diagrama Fabricación carcaza de Protección Cabezas .....	99
5.1.6 Diagrama Fabricación Estructura para Panel Fotovoltaico .....	100
5.2 Fabricación de partes .....	101
5.2.1 Acumulador.....	101
<b>5.3 SOLDADURA .....</b>	<b>103</b>
5.4 Accesorios .....	106
5.5 Recubrimiento superficial del recipiente.....	106
5.6 Montaje.....	108
5.6.1 Montaje Acumulador .....	109
5.6.2 Montaje General del Equipo.....	110
5.7 Colocación sensores.....	112
5.7.1 Galgas extensiométricas.....	112
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>114</b>
6.1 CONTROL DE CALIDAD JUNTAS SOLDADAS .....	114
6.1.1 TINTAS PENETRANTES.....	114

6.1.2 Pruebas de ultrasonido .....	117
6.2 Prueba hidrostática .....	121
6.3 Procedimiento de realización de pruebas .....	124
6.4 Deformaciones teóricas en el cuerpo del acumulador .....	127
6.5 Monitoreo y evaluación del sistema de calentamiento .....	129
6.6 Análisis de resultados .....	139
6.6 Análisis total .....	156
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>157</b>
7.1 Conclusiones .....	157
7.2 Recomendaciones .....	158
<b>Bibliografía.....</b>	<b>159</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de constantes para correlación de convección .....	17
Tabla 2 Referencia de consumo de agua caliente por usuario y día .....	49
Tabla 3. Factores de corrección irradiación solar.....	63
Tabla 4 Ángulos de inclinación .....	63
Tabla 5 Valores de K en Ecuador .....	64
Tabla 6. Aislamiento térmico para tuberías .....	72
Tabla 7. Energía requerida sistema solar.....	90
Tabla 8. Propiedades mecánicas del acero AISI 304.....	101
Tabla 9. Materiales montaje acumulador .....	109
Tabla 10. Materiales Montaje General .....	110
Tabla 11. Deformaciones Unitarias del cuerpo del acumulador .....	126
Tabla 12. Deformaciones Unitarias de la cabeza del acumulador .....	126
Tabla 13. Valores de Deformaciones del Cuerpo del Acumulador .....	130
Tabla 14. Valores de Deformaciones de la Cabeza del Acumulador.....	131
Tabla 15. Esfuerzos Transversales Cuerpo .....	132
Tabla 16. Esfuerzos Longitudinales Cuerpo.....	132
Tabla 17. Esfuerzos Transversales Cabeza.....	133
Tabla 18. Esfuerzos Longitudinales Cabeza.....	133
Tabla 19. Temperatura en el interior del acumulador .....	137
Tabla 20. Energía Colector Solar .....	139
Tabla 21. Deformaciones Cuerpo Acumulador .....	148
Tabla 22. Deformaciones Cabeza Acumulador .....	148
Tabla 23. Esfuerzos Transversales cuerpo .....	149
Tabla 24. Esfuerzos Longitudinales cuerpo .....	149
Tabla 25. Esfuerzos transversales cabeza.....	150
Tabla 26. Esfuerzos longitudinales cabeza .....	150
Tabla 28. Valores máximos acumulador .....	156

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Producción de agua caliente sanitaria mediante energía solar térmica.....	5
Figura 2. Gráfico de la Irradiancia vs Horas Pico solar en una superficie.....	6
Figura 3 Conducción de calor a través de una superficie.....	10
Figura 4. Conducción a través de un cilindro compuesto de varios materiales .....	11
Figura 5. Interacumulador con intercambiador de serpentín donde se presenta convección libre y convección forzada.....	14
Figura 6. Flujo externo.....	15
Figura 7 Flujo Interno.....	15
Figura 8 Esquema de una instalación solar .....	19
Figura 9. Acumulador de Agua Caliente Sanitaria.....	20
Figura 10 Acumulador de Agua Caliente Sanitaria.....	21
Figura 11. Acumulador Indirecto .....	22
Figura 12. Depósito de Inercia .....	22
Figura 13 Acumulador combinado .....	23
Figura 14 Dispositivo para evitar la mezcla de aguas de distinta temperatura .....	26
Figura 15 Dispositivo de estratificación de un acumulador.....	27
Figura 16 Proceso de Corrosión en el acero Inoxidable.....	29
Figura 17 Corrosión Inter cristalina .....	30
Figura 18 Corrosión por picadura .....	30
Figura 19 Corrosión Inter cristalina .....	31
Figura 20. Cabeza Torriesférica.....	39
Figura 21. Cabeza Elipsoidal .....	40
Figura 22. Cabeza Hemiesférica.....	40
Figura 23.Representación de esfuerzos .....	41
Figura 24. Esfuerzo vs Deformación .....	43
Figura 25. Esquema coeficiente de Poisson material isotrópico.....	43
Figura 26 . Esfuerzos en cilindros de pared delgada .....	44
Figura 27. Dirección de los esfuerzos en una cabeza de un recipiente.....	46
Figura 28. Dimensiones cabeza elipsoisal .....	46
Figura 29. Circulación natural .....	56
Figura 30.Lana Mineral .....	58
Figura 31 Valores de Irradiación en Ecuador .....	62
Figura 32. Termocupla Tipo J .....	80
Figura 33. Esquema Galga Biaxial.....	82
Figura 34. Características Galga Biaxial .....	83
Figura 35. Puente de Wheatstone .....	84
Figura 36. Amplificador AD620 .....	84
Figura 37. Esquema conexión AD594.....	85
Figura 38. Arduino Mega .....	88
Figura 39. Esquema conexión sensores .....	89
Figura 40. Diagrama conexión sistema monitoreo .....	93
Figura 41. Diagrama de fabricación de acumulador.....	94
Figura 42.Diagrama Proceso Cuerpo Cilíndrico .....	95

Figura 43. Diagrama Proceso cabezas .....	96
Figura 44. Ensamble Acumulador .....	97
Figura 45. Fabricación carcaza acumulador .....	98
Figura 46. Diagrama Proceso Carcaza Cabezas .....	99
Figura 47. Fabricación Soporte Panel .....	100
Figura 48. Corte plasma cabeza acumulador .....	102
Figura 49. Rolado cuerpo acumulador .....	102
Figura 50. Doblado Cabezas .....	103
Figura 51. Soldadura cuerpo acumulador .....	104
Figura 52. Soldadura cuerpo acumulador .....	105
Figura 53. Acumulador Finalizado .....	105
Figura 54. Soldadura Accesorios Acumulador .....	106
Figura 55. Cubierta acero galvanizado .....	107
Figura 56. Montaje Acumulador .....	108
Figura 57. Partes acumulador .....	110
Figura 58. Montaje General Acumulador .....	111
Figura 59. Colocación galgas en el acumulador .....	112
Figura 60. Acople Termocuplas .....	113
Figura 61. Kit tintas Penetrantes .....	115
Figura 62. Limpieza superficie .....	115
Figura 63. Aplicación Penetrante Accesorios Acumulador .....	116
Figura 64. Aplicación Revelador .....	117
Figura 65. Equipo de ultrasonido .....	118
Figura 66. Palpador .....	119
Figura 67. Patrón de calibración .....	119
Figura 68. Colocación glicerina en la soldadura del acumulador .....	120
Figura 69. Procedimiento de Ultrasonido .....	121
Figura 70. Colocación de tapones prueba hidrostática .....	122
Figura 71. Llenado de agua .....	122
Figura 72. Colocación de Accesorios para entrada de presión .....	123
Figura 73. Recipiente sometido a presión .....	123
Figura 74. Verificación de Fugas .....	124
Figura 75. Calibración deformímetro .....	125
Figura 76. Esfuerzos en cilindros de pared delgada .....	135
Figura 77. Esfuerzos Admisibles para las distintas categorías de esfuerzos .....	137
Figura 78. Deformación Cuerpo Acumulador .....	140
Figura 79. Deformaciones Cabeza Acumulador .....	140
Figura 80. Deformación vs Temperatura superficial cuerpo acumulador .....	141
Figura 81. Relación Esfuerzo – Temperatura Ambiental .....	141
Figura 82. Energía Demandada vs Energía Entregada .....	145
Figura 83. Consumo ACS .....	146
Figura 84. Relación temperatura de consumo de agua vs Tiempo .....	147
Figura 85. Temperatura Superficial acumulador vs Deformación Cuerpo .....	153
Figura 86. Temperatura Superficial acumulador vs Deformación Cabeza .....	153
Figura 87. Esfuerzo vs Presión Cuerpo Acumulador .....	154
Figura 88. Esfuerzo vs Presión Cabeza Acumulador .....	154

## RESUMEN

El presente proyecto desarrolla el diseño y construcción de un acumulador de agua potable de 140 litros, para el colector solar del DECEM, construido bajo normas ASME Sección VIII, el mismo contempla el monitoreo de temperatura y deformaciones longitudinales y transversales. El proyecto consta de un sistema de adquisición de datos de deformaciones y temperatura, para ello se utilizan galgas extensiométricas (transductores eléctricos activos) instaladas de forma directa en la superficie del acumulador tanto en cuerpo como en la cabeza que están sometidos a presión interna y para las temperaturas se utilizan termocuplas sumergibles que están en la entrada – salida y parte superior del acumulador y un sensor de superficie, todos los datos adquiridos se proyectan en una pantalla LCD, el sistema es alimentado a través de un panel fotovoltaico que genera la energía suficiente para su funcionamiento. La idea principal del proyecto es la combinación de sistemas, calentamiento solar de agua y generación de energía aprovechando la radiación solar aplicado en dichos sistemas. Este recurso natural se lo aprovecha de forma sustentable y se optimiza su producción energética.

### **Palabras Claves:**

ACUMULADOR

ADQUISICIÓN

DEFORMACIÓN

TEMPERATURA

GENERACIÓN

## **ABSTRACT**

This project develops design and construction of a drinking water storage tank 140 liters, for the solar collector DECEM built under ASME Section VIII, it provides for monitoring temperature and longitudinal and transverse strains. The project consists of a data acquisition system strain and temperature, for it used strain gauge installed (live electrical transducers) directly on the surface of the accumulator in both body and head that are subject to internal pressure and temperatures submersible thermocouples are used in the input - output and upper storage tank and a sensor surface, all acquired data is projected on an LCD screen, the system is powered by a photovoltaic panel that generates enough power to operate. The main idea of the project is the combination of systems, solar water heating and power generation using solar radiation and implemented in such systems. This natural resource is the advantage of sustainable and its energy production is optimized.

Keywords:

ACCUMULATOR

ADQUISITION

DEFORMATION

TEMPERATURE

GENERATION

## **CAPITULO 1**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 Antecedentes**

En la actualidad en nuestro país, las Energías Renovables van teniendo cada vez un campo amplio de aplicaciones, esto debido a que el Gobierno está dispuesto a apoyar a las empresas que se dediquen a este tipo de actividades a través de la Dirección Nacional de Energía Renovable DNER. Sin embargo no son muchas las empresas dispuestas a incursionar en este tema y los proyectos realizados son de poco aporte científico, es por ello que en nuestro país estos proyectos son de bajo rendimiento y de baja eficiencia.

La energía renovable es aquella que se obtiene a través de fuentes inagotables, como lo es el sol, el viento, las mareas, la temperatura de la tierra, entre otras, y su disponibilidad no se disminuye en el tiempo.

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol. La Energía solar térmica es utilizada para producir agua caliente de baja temperatura para uso sanitario y calefacción, son ideales para casas habitaciones, residencias, hoteles, hospitales, lavanderías, gimnasios, etc. cualquier lugar de tipo doméstico o industrial donde se requiera calentar eficientemente el agua sin necesidad de utilizar combustibles.

Los sistemas de almacenamiento de Agua Caliente Sanitaria están muy extendidos en nuestra sociedad. En la actualidad consideramos el agua caliente como un requisito de confort imprescindible en nuestras vidas.

Los sistemas de preparación y distribución de agua caliente evolucionaron de la mano de la ingeniería hidráulica y energética hasta el

punto de poder convertirse en un bien común al alcance de la mayoría de la población.

En el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), existen distintos tipos de sistemas solares térmicos para el calentamiento de agua de uso doméstico, los cuales cuentan con acumuladores de agua caliente sanitaria que deben ser diseñados bajo normativa, debido a las distintas condiciones ambientales a los cuales están expuestos, y así obtener el mayor rendimiento energético con el fin de cubrir la demanda de agua caliente que necesitan los usuarios.

## **1.2 Definición del problema**

El laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) no cuenta con un acumulador de Agua Caliente Sanitaria (ACS) para uno de sus sistemas térmicos, sin este acumulador el sistema no está en funcionamiento.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 General**

Diseñar y construir un acumulador para agua sanitaria con monitoreo de deformaciones y temperatura con capacidad de 140 litros a 200 psi bajo normas ASME para el DECEM

### **1.3.2 Específicos**

- Realizar el análisis térmico del proceso
- Definir los parámetros de diseño del acumulador a presión
- Desarrollar los cálculos para un correcto dimensionamiento del acumulador a presión
- Definir el material adecuado del acumulador para este tipo de aplicaciones
- Establecer los espesores de láminas de acuerdo a las normas ASME

- Definir el tipo óptimo del aislamiento térmico del acumulador
- Definir variables de monitoreo.
- Implementar un sistema de adquisición de datos
- Establecer la validación de resultados

#### **1.4 Alcance**

El proyecto de investigación tiene como finalidad presentar de una manera completa, detallada y comprensible un nuevo diseño de un acumulador a presión bajo normas ASME, para el colector solar que se encuentra en el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas, así como también se realizara el cálculo y análisis de cada uno de los elementos que lo componen, presentando planos detallados y procesos de fabricación.

Para sustentar el desarrollo del proyecto de investigación se realizaran pruebas tales como prueba hidrostática, control de calidad de juntas soldadas, monitoreo de deformaciones y temperatura que permita visualizar el comportamiento del acumulador bajo condiciones de servicio.

Este proyecto se limita al almacenamiento de agua caliente sanitaria, caso contrario de que se necesite la manipulación de otro fluido será necesario un análisis análogo al presentado en este proyecto.

#### **1.5 Justificación e importancia del proyecto**

El desarrollo de este proyecto favorece notablemente a la preservación y saneamiento del medio ambiente puesto que usa fuentes no contaminantes, ya que el calentamiento de agua mediante la energía solar es una tecnología económica y competitiva, no tiene más costos una vez instalada que el mantenimiento el cual es sencillo.

Por medio de este proyecto se asegurará el buen funcionamiento del sistema de agua caliente sanitaria, con el adecuado almacenamiento de la misma , evitando que el recipiente sufra imperfecciones de alguna índole, y sirva de modelo en el futuro para la construcción de recipientes en distintas aplicaciones, permitiendo a los estudiantes de Ingeniería Mecánica la oportunidad de poner en práctica los conocimientos de diseño mecánico, materiales de aislamiento térmico, procesos de fabricación , sistemas de monitoreo más adecuados en la actualidad, con el fin de poder familiarizarse con las diversos códigos de construcción y normas ASME que garantizan cualquier diseño de calderas y recipientes a presión.

Es de mucho interés implementar un monitoreo a este tipo de sistemas que utilizan energía solar ya que mediante la correcta instrumentación se puede adicionar mayores herramientas de adquisición y procesamiento de señales , realizar operaciones de conexión y desconexión automática, que permitirá realizar registros de eventos en forma cronológica para evaluar el desempeño del sistema en las condiciones más críticas.

En el país no existen metodologías claras para dimensionar de una manera correcta y efectiva los sistemas de calentamiento solar, existen sistemas donde la oferta de agua caliente no abastece la demanda, no existe adecuada selección de equipos y accesorios, es también importante realizar un estudio previo del lugar conociendo su radiación solar factor importante para la eficiencia de estos sistemas.

## CAPÍTULO II

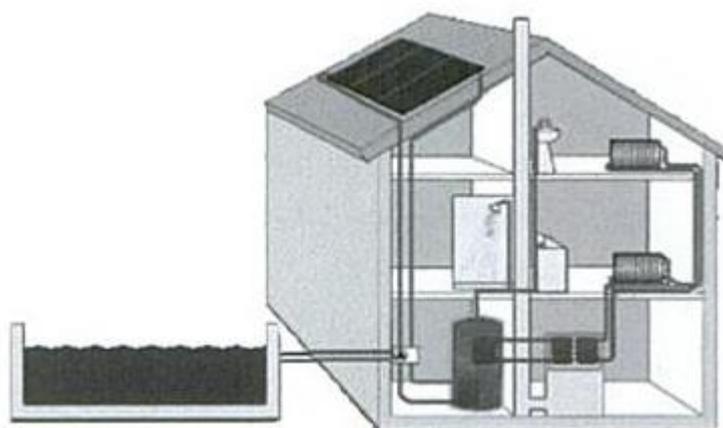
### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Conceptos básicos de energía solar

##### Energía solar térmica

Es el aprovechamiento de la energía del sol para producir calor de forma respetuosa con el medio ambiente, la cual puede ser usada en la producción de agua caliente para consumo humano, cocción de alimentos, así como también la producción de energía mecánica y consecutivamente energía eléctrica a partir de esta. La energía solar térmica es una energía renovable, que puede almacenarse.

En la actualidad la capacidad o potencia de energía solar instalada supera a la de otras renovables con altos índices de desarrollo, la mayoría de captadores solares instalados en el mundo se utilizan en viviendas unifamiliares para la producción de agua caliente sanitaria tal como se muestra en la figura 1. (Martínez, 2010)



**Figura 1** Producción de agua caliente sanitaria mediante energía solar térmica

**Fuente** (Térmica, 2006)

## Radiación Solar

La radiación solar térmica es una corriente de energía que el sol irradia uniformemente en todas las direcciones del espacio en formas de ondas electromagnéticas, su intensidad depende de la altura solar (latitud, fecha y hora del día. (Tous, 2009)

## Irradiancia

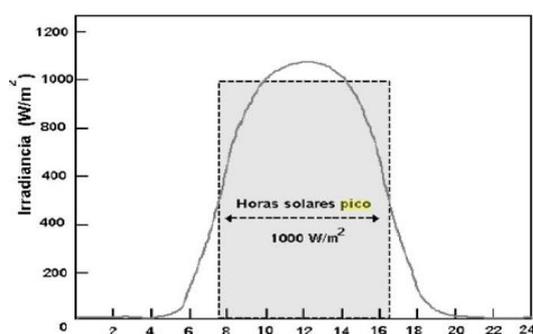
“La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie sobre un plano dado” (Tous, 2009)

## Insolación

Es la acumulación de energía durante un período de tiempo, es la captación de energía sobre una superficie considerando un tiempo promedio de permanencia.

## Hora sol pico (hsp)

Es la mayor cantidad de insolación en un área o espacio en un período de tiempo (figura 2), lo que quiere decir la cantidad de insolación captada por un panel solar o cualquier tipo de captador solar en una hora es denominada la hora solar pico, esta unidad es muy útil en el análisis de sistemas fotovoltaicos.



**Figura 2.** Gráfico de la Irradiancia vs Horas Pico solar en una superficie

Fuente (Aparicio, 2010)

### Ángulo de puesta del sol

Es la distancia entre el medio día solar y el momento en el que el sol se oculta por el horizonte, este ángulo tiene una variación según el día del año y se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$Ws = \cos^{-1}(-\tan\delta \cdot \tan\phi) \quad (1)$$

Donde:

El ángulo horario  $Ws$  lo se ha definido a partir de la latitud  $\phi$  y la declinación  $\delta$ .

### Irradiación solar extraterrestre

Es el cociente entre el flujo de radiación que recibe una superficie y su área. Para calcular la irradiación se utiliza la siguiente ecuación. (Martinez, 2011)

$$I_o = \beta_o * \epsilon_o(\sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega) \quad (2)$$

## 2.2 Conceptos básicos de transmisión de calor

### Números adimensionales de transferencia de calor y masa

#### Número de Nusselt:

Gradiente de temperatura adimensional de la superficie. (Incropera, 1999)

$$Nu = \frac{h * L}{K} \quad (3)$$

Donde:

**$h$** : es el coeficiente de transmisión de calor

**$L$** : es una longitud característica

**k:** es la conductividad térmica.

### Número de Reynolds:

Razón de las fuerzas de inercia y viscosas.

$$Re = \frac{V * L}{\nu} \quad (4)$$

Donde:

**V:** velocidad del fluido

**L:** longitud característica del cuerpo

**v:** viscosidad cinemática

### Número de Prandt:

Razón de las difusividades de momento y térmica.

$$Pr = \frac{cp * \mu}{k} \quad (5)$$

Donde:

**cp:** calor específico a presión constante

**u:** viscosidad dinámica

**k:** conductividad térmica

## 2.2.1 Transmisión del calor

Es la forma de energía que se puede transmitir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura (Cengel, 2007)

Es de vital importancia que exista una diferencia de temperatura entre ambos cuerpos, de modo que un cuerpo gane energía y el otro pierda en un

tiempo determinado, dependiendo de cuan mayor sea la diferencia de temperaturas.

La primera Ley de la termodinámica dice que la cantidad de calor perdida por un cuerpo debe ser igual a la cantidad de calor absorbida por el otro, en cambio la Segunda Ley de la termodinámica indaga en que siempre la transmisión de calor se debe dar desde el cuerpo más caliente hacia el más frío.

La transmisión de calor tiene una influencia decisiva en los procesos de refrigeración, calefacción así como también en la construcción de los interacumuladores de agua caliente sanitaria (ACS)

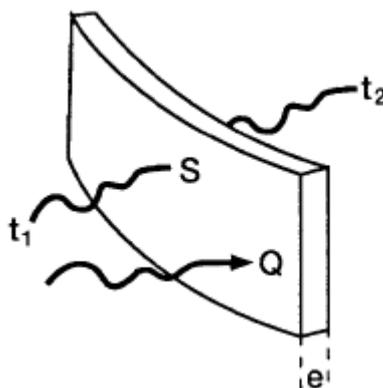
Existen tres procesos de transmisión de calor por conducción, convección y radiación

### **2.2.2 Transmisión de calor por conducción**

Conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción de esas partículas, la conducción puede darse en sólidos, líquidos o gases. (Cengel, 2007)

Por ejemplo en la figura 3 se toma una superficie de área  $S$  y espesor  $e$ , a la cual a una de sus caras se le somete a una temperatura uniforme  $t_1$  y la otra cara a una temperatura  $t_2$ , se observa que la velocidad de flujo de calor  $Q$  es directamente proporcional al área  $S$  y a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional al espesor  $e$ , a esta proporcionalidad le transformamos en igualdad mediante la constante de proporcionalidad  $K$  llamada conductividad térmica, a mayor valor de  $K$  mayor será el calor transmitido. (García E. M., 1996)

$$Q = K * S * \frac{t_1 - t_2}{e} \quad (6)$$



**Figura 3** Conducción de calor a través de una superficie

Fuente (García E. M., 1996)

### **Conducción estacionaria unidimensional**

Esta conducción es la que se establece en sólidos de caras paralelas, siempre y cuando se encuentre en equilibrio termodinámico, o régimen estacionario.

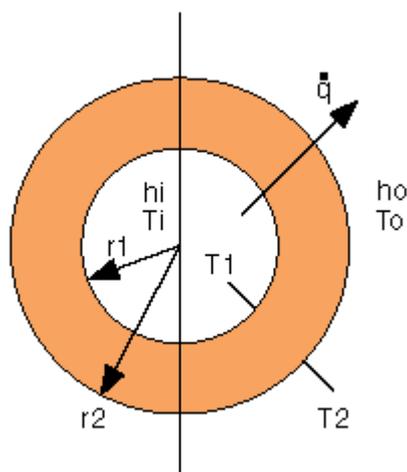
### **Conducción a través de una pared cilíndrica**

Existen varios sistemas cilíndricos o esféricos en los que la conducción de calor se efectúa únicamente en la dirección radial dándose así una conducción unidimensional.

En las tuberías en las cuales su diámetro es pequeño comparado con la longitud se puede asumir una conducción radial.

### **Pared cilíndrica compuesta**

En la figura 4 se muestra una pared compuesta por una serie de capas de materiales distintos.



**Figura 4.** Conducción a través de un cilindro compuesto de varios materiales

**Fuente.** (María José Montes Pita, 2014)

En donde cada una de las capas es de distinto material, la temperatura del fluido interior es mayor que la temperatura del fluido exterior, la transmisión de calor va desde el interior de la pared cilíndrica hacia la capa exterior, la distribución de temperaturas es continua a lo largo de toda la pared cilíndrica.

La transmisión de calor por convección al interior y exterior se tiene:

$$q = \frac{2 * \pi * r1 * (t_f1 - t1)}{\frac{1}{h1}} \quad (7)$$

Donde :

**r1:** radio pared cilíndrica

**t<sub>f</sub>1:** temperatura fluido ( interior o exterior)

**t1 :** temperatura superficial capa cilíndrica ( interior o exterior)

**h1 :** coeficiente de convección ( interior o exterior)

La transmisión de calor por conducción se tiene:

$$q = \frac{2 * \pi * (t_1 - t_2)}{kA * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (8)$$

Donde :

**r1**: radio capa cilíndrica material 1

**r2**: radio capa cilíndrica material 2

**t1** : temperatura superficial capa cilíndrica material 1

**t2** : temperatura superficial capa cilíndrica material 2

**kA** : conductividad térmica capa cilíndrica material

Sumando las expresiones se tiene la ecuación total de transmisión de calor dada por:

$$q = \frac{2 * \pi * (t_{f1} - t_{f4})}{\frac{1}{r_1 * h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{KA} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{KB} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{KC} + \frac{1}{r_4 * h_4}} \quad (9)$$

Donde :

**t<sub>f1</sub>**: temperatura fluido interior

**t<sub>f2</sub>**: temperatura fluido exterior

**r1,r2,r3,r4**: radios capas cilíndricas distintos materiales

**KA, KB ,KC** : conductividad térmica capas cilíndricas distintos materiales

**h1**: coeficiente convectivo interior

**h4** : coeficiente convectivo exterior

### 2.2.3 Transmisión de calor por convección

“Designamos con el término de convección el mecanismo de transmisión calorífica que se produce en un fluido cuando una parte de este se mezcla con otro a causa de los movimientos de la masa del mismo” (García E. M., 1996)

Puede existir este tipo de transmisión de calor entre un fluido y un cuerpo sólido que se encuentre a distinta temperatura.

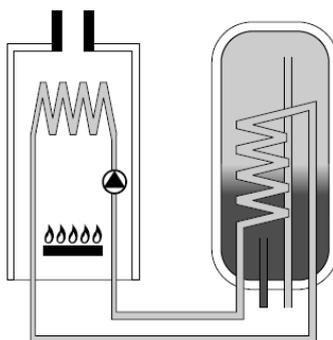
La ecuación de la transmisión de calor por convección viene dada por la ley de Newton:

$$\frac{Q}{S} = h(ts - tf) \quad (10)$$

Donde **S** es la superficie del sólido, **h** el coeficiente de película cuyo valor depende de la geometría del sólido, de la composición del fluido y de la hidrodinámica del movimiento del fluido, **ts** temperatura superficial del sólido y **tf** temperatura del fluido. Por lo tanto dependiendo de la geometría se obtiene un intercambio rápido y eficiente.

- Si el fluido es movilizadado por fuerzas mecánicas se denomina convección forzada
- Si el movimiento ocurre por diferencias de densidad se denomina convección libre.

En la figura 5 se indica la combinación de convección tanto libre como forzada.



**Figura 5.** Interacumulador con intercambiador de serpentín donde se presenta convección libre y convección forzada

**Fuente** (García E. M., 1996)

### **Convección Natural y Forzada**

Depende si el movimiento es provocado o no por la transmisión de calor en la cual si no existe un gradiente de temperatura no existe movimiento, en este caso se denomina convección natural, y convección forzada en la cual así no exista un gradiente de temperatura existiría movimiento ocasionado por un medio mecánico (bomba, diferencia de nivel) o medio térmico (convección natural en otro sistema).

La convección natural siempre aumenta el flujo de calor y esta cantidad es determinada por el número adimensional Nusselt.

### **Flujo interno y flujo externo**

La convección térmica se da entre una pared y el fluido que la baña, es por eso que existen varias configuraciones como flujo externo, mostrado en la figura 6 y flujo interno figura 7.

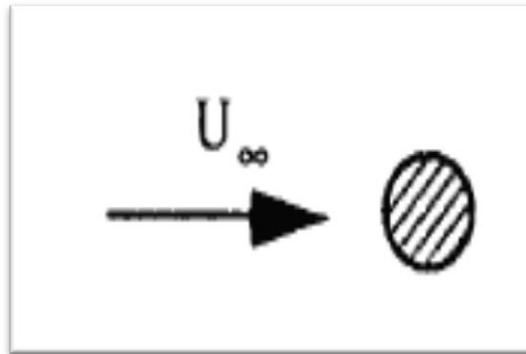


Figura 6. **Flujo externo**

Fuente: (Martínez, 2010)

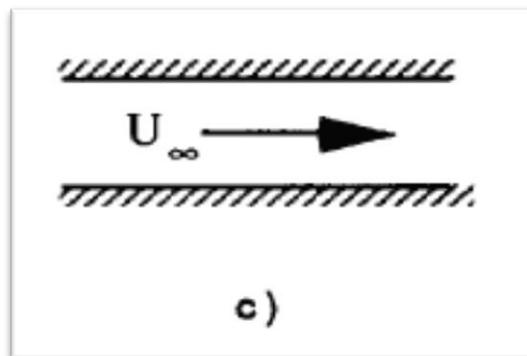


Figura 7 **Flujo Interno**

Fuente: (Martínez, 2010)

### **Correlaciones de transmisión de calor por convección**

Existen correlaciones empíricas utilizadas usadas en los cálculos de transmisión de calor por convección:

#### **Convección Forzada tubo régimen laminar**

Se da cuando el número de Reynolds es  $< 2400$ , en estos casos  $Nu \approx 4$  o evaluado en la fórmula de Test:

$$Dh = \frac{4 * \text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (11)$$

Donde:

**Dh:** diámetro hidráulico equivalente

El diámetro hidráulico se utiliza cuando la sección no es circular.

### Convección Forzada tubo régimen turbulento

Se da cuando el número de Reynolds es  $> 4000$  y  $Pr > 0.7$ , evaluado en la fórmula de Dittus Boelter. Estas ecuaciones son utilizadas para diferencias de temperatura de pequeñas a moderadas.

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (12)$$

Donde:

**Pr:** número de Prandtl

**n:** 0.3 para enfriamiento del fluido o 0,4 para calentamiento

### Convección Natural externa a un cilindro horizontal

Se da cuando el número de  $Ra < 10^{12}$  estas correlaciones empíricas son adecuadas para la mayoría de los cálculos, aplicando la ecuación de Churchill y Chu en donde el número de Nusselt es igual:

$$Nu = \left[ 0.6 + \frac{0.387 * Ra^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 \quad (13)$$

Donde:

$$Ra = \frac{g * \beta(T_s - T_\infty) * D^3 * Pr}{\nu^2} \quad (14)$$

**Ra:** número de Rayleigh

**g:** gravedad

$\beta$  :  $1/ T_f$

$T_s$  : temperatura superficial

$T_\infty$  : Temperatura medio circundante

$D$ : Diámetro tubo

$Pr$ : número de Prandtl

$\nu$ : viscosidad cinemática

### Convección en el exterior de una tubería

El coeficiente convectivo exterior en una tubería depende del número de Reynolds, para cada número de Reynolds existe un valor de C y m necesarias para calcular el número de Nusselt se muestran a continuación en la tabla 1.

**Tabla 1.**

Valores de constantes para correlación de convección

<b>Re</b>	<b>C</b>	<b>m</b>
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40000	0.193	0.618
40000-400000	0.027	0.805

**Fuente:** (Incropera, 1999)

### Determinación Energía Colector Solar

Para el cálculo de la Energía en el Sistema se utiliza la ecuación 15.

$$E = m \cdot c_p \cdot (T_{uso} - T_{red}) \quad (15)$$

Donde:

**cp:** calor específico a presión constante

**Tuso:** temperatura de uso

**Tred:** temperatura de red

**m:** flujo másico

### 2.2.4 Transmisión de calor por radiación

La radiación es la forma de energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios de las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, a diferencia de la convección y la radiación la diferencia de calor no requiere de un medio interventor. (Cengel, 2007)

La ecuación de la radiación la gobierna la ley de Stefan-Boltzman que está dada por:

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (16)$$

Donde:

**E:** es la velocidad de energía por unidad de superficie

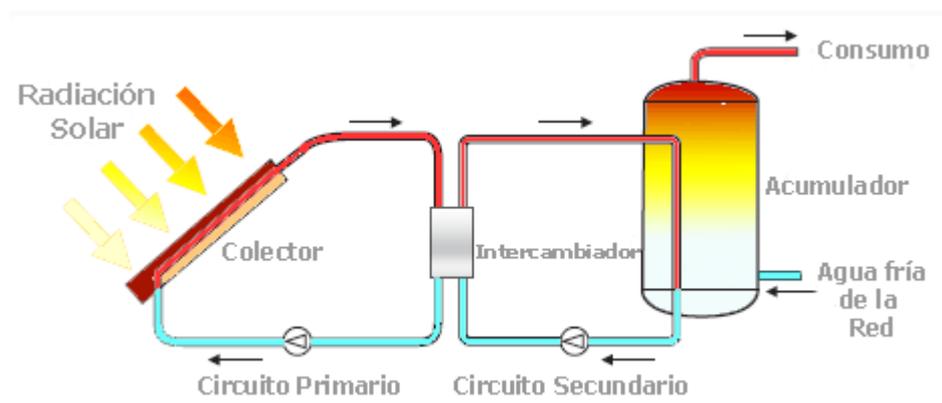
**T:** la temperatura absoluta del cuerpo.

**$\varepsilon$**  : emisividad de la superficie

### 2.3 Instalaciones solares térmicas

Son equipos compactos que se usan para múltiples aplicaciones domésticas, calefacción, climatización de piscinas, en ellas la energía solar es captada por un dispositivo que absorbe la radiación, llamado colector

solar, con el fin de producir en muchos casos agua caliente sanitaria. Es aquella que está constituida por un sistema captador, de intercambio, acumulador, sistema auxiliar o de apoyo, circuito hidráulico, sistema de control, como se detalla en la figura 8.



**Figura 8** Esquema de una instalación solar

**Fuente.** (Benito, 2012)

### 2.3.1 Agua caliente sanitaria (ACS)

Es la generación de agua utilizada para consumo humano la misma que ha sido calentada previamente, los sistemas de preparación de agua caliente sanitaria van de la mano con la ingeniería hidráulica y energética, por medio de sistemas de aislamientos, intercambiadores y fuentes alternativas de energía se ha permitido la obtención de agua caliente de calidad con menor impacto en el medio ambiente y un mayor ahorro energético.

### 2.4 Sistema de Acumulación en las instalaciones solares

Dependiendo del tipo de agua que contiene en su interior y el tipo de instalación los acumuladores pueden ser:

- Acumuladores de Agua Caliente Sanitaria (ACS)
- Acumuladores de Inercia

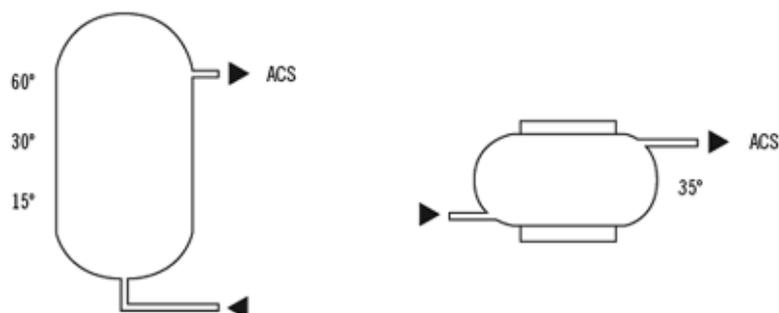
- Acumuladores combinados

### 2.4.1 Acumuladores de agua caliente sanitaria (ACS)

Son depósitos donde se acumula la energía térmica captada de los colectores solares.

Los acumuladores tienen una entrada para agua fría y una salida para el agua caliente, están hechos de materiales que evitan el efecto corrosivo de agua caliente

Su forma puede ser cilíndrica, en donde la altura siempre sea mayor al diámetro del acumulador, como se observa en la figura 9, para con ello facilitar la estratificación de temperaturas, y también deben soportar niveles de presión y temperatura altas.



**Figura 9.** Acumulador de Agua Caliente Sanitaria

**Fuente.** (Piña, 2008)

#### 2.4.1.1 Requisitos de un acumulador de agua caliente sanitaria (ACS)

- Adecuada estratificación de temperaturas
- Elevada capacidad térmica del medio de almacenamiento
- Óptimo aislamiento térmico
- Alta resistencia dentro de los rangos de presión y temperatura de trabajo
- Larga durabilidad

- Adecuadas propiedades medioambientales
- Costo económico

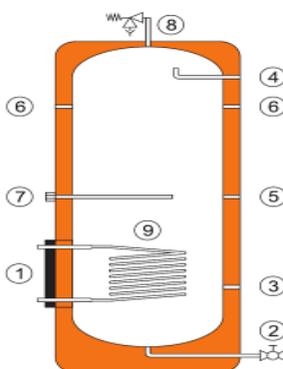
#### 2.4.1.2 Tipos de Acumuladores de ACS

Existen dos tipos de acumuladores de ACS (Agua caliente sanitaria), dependiendo de la ubicación de la fuente energética

- Acumuladores Directos
- Acumuladores Indirectos

##### 2.4.1.2.1 Acumuladores Directos

Son aquellos que contienen en su interior la fuente energética ya sea resistencia eléctrica o calentador de gas para el calentamiento de ACS, este tipo de acumuladores no sirven para consumos prolongados ya que su fuente de calentamiento es de baja potencia tal como se ilustra en la figura 10.

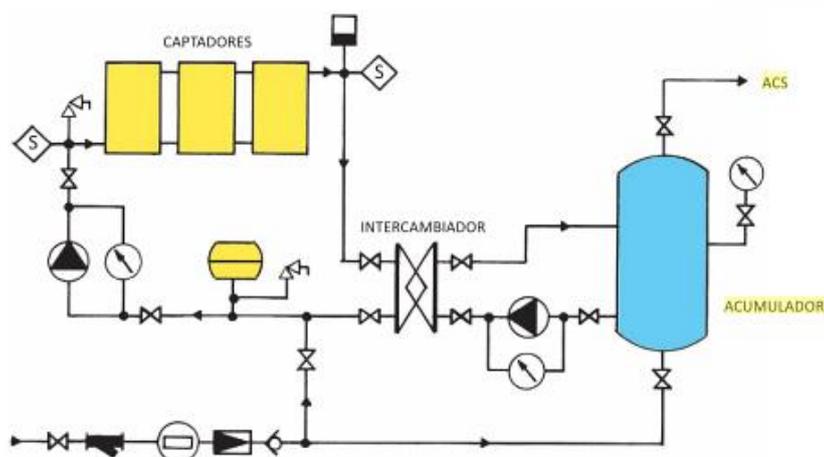


**Figura 10** Acumulador de Agua Caliente Sanitaria

**Fuente.** (Jiménez, 2013)

##### 2.4.1.2.2 Acumuladores Indirectos

Los acumuladores indirectos son aquellos que necesitan calentamiento adicional mediante una fuente energética externa que es un intercambiador de calor, como se muestra en la figura 11.



**Figura 11.** Acumulador Indirecto

**Fuente.** (Viloria, 2013)

## 2.4.2 Acumuladores de Inercia

Son utilizados en instalaciones solares para producción de agua caliente sanitaria, estos acumuladores poseen un intercambiador el cual separa el agua potable que va a ser consumida del agua dentro del acumulador.

La presión de trabajo es más baja que en los acumuladores de agua caliente sanitaria, no almacenan agua potable, son construidos de acero negro que permite resistencia a altas temperaturas, se utiliza este tipo de acero ya que el agua circula en un circuito cerrado y no se distribuye a ningún tipo de consumo, son empleados en sistemas de calefacción, (figura 12).



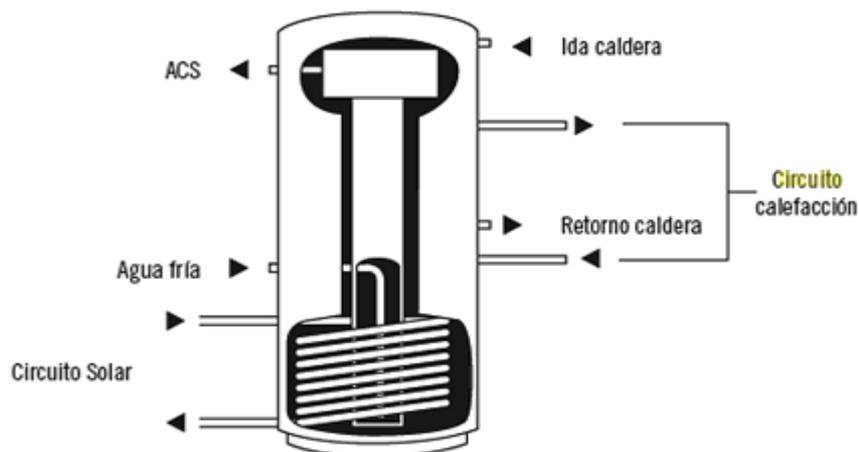
**Figura 12.** Depósito de Inercia

**Fuente.** (<http://javiponce-formatec.blogspot.com/>, s.f.)

### 2.4.3 Acumuladores combinados

Acumulador de inercia en cuyo interior poseen un acumulador de agua caliente sanitaria, su aplicación es para instalaciones solares pequeñas.

Posee un sistema de apoyo conectado por la parte superior del acumulador de inercia con el objetivo de aumentar la temperatura para usos sanitario, la zona intermedia se aprovecha para aumentar la temperatura del agua de retorno que pasa por el circuito de calefacción mientras que en la zona inferior dispone de un intercambiador de calor, alimentado por los calentadores solares como se detalla en la figura 13.



**Figura 13** Acumulador combinado

Fuente (Piña, 2008)

## 2.5 Materiales de los ACS

### 2.5.1 Acumuladores de Resinas epoxídicas

Estos acumuladores son capaces de resistir temperaturas de hasta 80 °C, debido a que posee un revestimiento plástico puede existir la aparición de poros, por ello es recomendable realizar un tratamiento a la superficie interna del acumulador que facilite la fijación del revestimiento, son más económicos que los de acero vitrificado y acero inoxidable.

Una Resina Epóxi o poliepóxido es un polímero termoestable (la resina) que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Las resinas epóxi más frecuentes son producto de una reacción entre bisfenol-a y la epiclorohidrina, el bisfenol A se obtiene de fenol y acetona. (<http://allstudies.com/>, s.f.)

### **Propiedades resinas epoxídicas**

- Humectación y de adherencia son óptima.
- Buen aislamiento eléctrico.
- Buena resistencia mecánica.
- Resisten la humedad.
- Resisten el ataque de fluidos corrosivos.
- Resisten temperaturas elevadas
- Excelente resistencia química
- Poca contracción al curar
- Excelentes propiedades Adhesivas.

### **2.5.2 Acumuladores de Acero Negro**

Estos acumuladores son utilizados en circuitos, en donde no circula agua de consumo ya que no poseen resistencia ante la corrosión, soportan altas temperaturas y son más económicos que los aceros vitrificados, aceros inoxidable y aceros con revestimiento plástico

### **2.5.3 Acumuladores Vitrificados**

Tienen resistencia a temperaturas altas, estos acumuladores poseen un compuesto de vidrio que aumenta la resistencia del acero para elevadas temperaturas. Debido a la fragilidad de este compuesto de vidrio es necesario colocar una capa de níquel para adherir el vidrio al acero así como también evitar la formación de poros. Pueden presentar problemas como:

- Pequeña adherencia del vitrificado al acero del tanque.
- Superficie del vitrificado discontinua e irregular
- Poros
- Microporos que permiten que el agua tenga contacto con el acero del tanque.

#### **2.5.4 Acumuladores de Acero inoxidable**

Son más ligeros que los de acero vitrificado, y contienen importantes cantidades de níquel pero carecen de cobre y nitrógeno, no presentan problemas de corrosión y pueden llegar a soportar temperaturas mucho más elevadas, su costo es elevado, y presentan problemas cuando el agua tiene alto contenido de cloro ya que provoca corrosión por picaduras, el proceso de soldadura en este tipo de materiales son complicados

### **2.6 Aspectos de diseño y funcionamiento de los acumuladores**

Cuando se reduce las pérdidas térmicas, teniendo una adecuada protección interior y descarga térmica, se mejora el funcionamiento de un acumulador de ACS, estos acumuladores deben poseer una adecuada estratificación de temperaturas, y bajas pérdidas térmicas.

#### **2.6.1 Estratificación de temperaturas:**

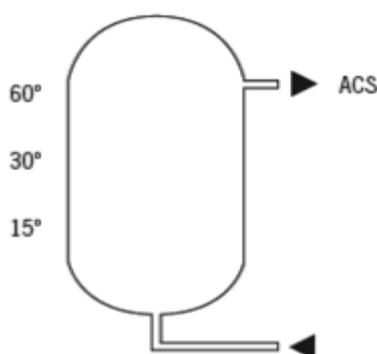
El efecto termosifón es un movimiento térmico circular que se da por estratificación de temperaturas, entre mayor sea la diferencia de temperatura entre el agua que hay en el colector y el agua almacenada en el tanque, más rápido fluye el agua a través del circuito, es por eso que el calentamiento solar se lo aplica en la parte baja del acumulador donde ingresa el agua fría , en el interior del acumulador el agua crea una distribución vertical de temperaturas debido a la diferencia de densidades , provocando así que el agua más caliente se situé en la parte superior del acumulador .

Para mejorar la estratificación de temperaturas la relación altura-diámetro debe ser tan alta como sea posible que permite que:

- El agua extraída de la parte superior tenga mayor temperatura
- El agua en la parte inferior del acumulador tenga la menor temperatura posible.

### 2.6.2 Mezcla

La homogenización de la temperatura dentro del agua se da debido a la velocidad de entrada de la misma, provocando que la estratificación desaparezca y el funcionamiento de la instalación solar sea ineficaz, para lo cual se pueden colocar dispositivos como tubos difusores en las tuberías de entrada al acumulador (figura 14).



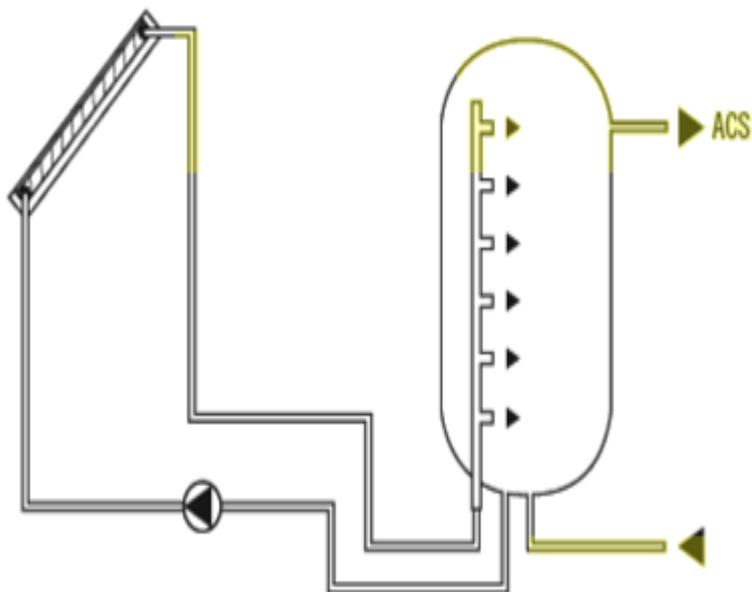
**Figura 14** Dispositivo para evitar la mezcla de aguas de distinta temperatura

Fuente (García E. M., 1996)

### 2.6.3 Dispositivo de Estratificación de carga térmica

Existen varios dispositivos de carga térmica internos y externos al acumulador, los cuales permiten que el agua que sale del intercambiador exterior ingrese al acumulador a la altura que le pertenece según la temperatura, que evita que ascienda sobre la misma agua, con la ayuda del intercambiador se aumenta la estratificación de temperaturas dentro del acumulador y mejorar el funcionamiento del sistema.

Con este dispositivo se evita que exista una reducción de la temperatura del agua al momento que esta ingresa en la zona donde el agua almacenada se encuentra a temperatura superior, también la reducción de energía de apoyo (figura 15).



**Figura 15** Dispositivo de estratificación de un acumulador

**Fuente.** (Piña, 2008)

## 2.7 Aislamiento térmico

Aislamiento térmico está asociado al concepto de capacidad de control de la transmisión de calor cuando se desea que no exceda ciertos límites.

Por lo tanto se deben tomar las siguientes medidas:

- Apropriados materiales aislantes
- Tuberías de conexión y accesorios aislados
- Instalación adecuada de las tuberías de conexión para evitar pérdidas térmicas.
- Reducir la relación entre la superficie exterior del acumulador y el volumen del mismo.
- Se debe evitar que los aislamientos no tengan elementos clorofluorocarbonos, ni tampoco PVC y deben ser medioambientalmente adecuados y características como:
- Buena resistencia mecánica

- Bajo coeficiente de conductividad térmica
- Adecuados para el rango de temperatura de trabajo

### **2.7.1 Materiales Aislantes:**

- Espuma rígida de poliuretano inyectado
- Lana de roca
- Fibra de vidrio
- Poliestireno extruido
- Espuma de Poliuretano
- Corcho
- Productos ligeros reflectantes

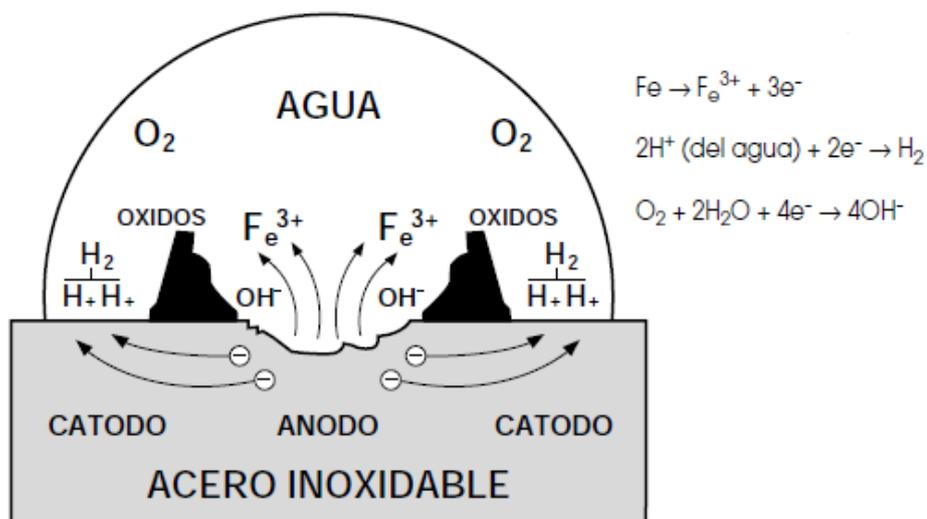
En estos materiales se debe utilizar algún tipo protección mecánica o revestimiento exterior, el elemento protector depende del lugar donde se coloque el acumulador.

Se debe evitar la aparición de puentes térmicos mediante la utilización de elementos adecuados.

### **2.8 Corrosión en el Acumulador de Agua caliente sanitario**

Es la destrucción de un metal por diversas reacciones químicas o electroquímicas con el medio que lo rodea. La velocidad con la que se produce la corrosión se suele indicar por la pérdida de peso por unidad de superficie en un tiempo o por la profundidad del metal atacado en un tiempo .Fuente (García E. M., 1996)

Algunas veces se forma una película superficial de un compuesto del metal, que disminuye la velocidad de corrosión e impide el desarrollo de la reacción (figura 16).



**Figura 16** Proceso de Corrosión en el acero Inoxidable

(García E. M., 1996)

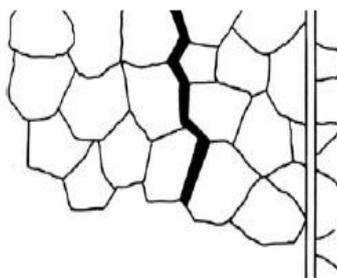
### Corrosión Galvánica

Es la formación de un ánodo y un cátodo en un metal que esté en contacto con un electrolito en un metal que este en contacto con un electrolito por ejemplo (agua) o entre dos metales de potencial diferente para evitar esta corrosión se debe montar manguitos electrolíticos entre el acumulador y las tuberías de metales diferentes. (García E. M., 1996)

### Corrosión Intercristalina

Se localiza normalmente a lo largo de las uniones soldadas, cuando los depósitos son hechos de acero inoxidable.

Este tipo de corrosión tiene lugar a gran profundidad, por lo cual no son notorios sus cambios como se detalla en la figura 17.



**Figura 17** Corrosión Intercristalina

(García E. M., 1996)

### **Corrosión por picaduras**

Es un ataque local que atraviesa el metal, se presentan muy frecuentemente en los aceros inoxidable, que depende de los componentes del acero y la calidad de soldadura (figura 18).



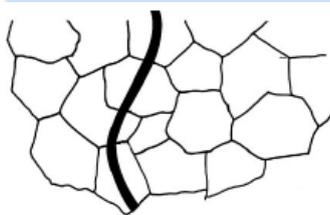
**Figura 18** Corrosión por picadura

Fuente (García E. M., 1996)

### **Corrosión bajo tensión**

Se presentan en los aceros austeníticos, aun cuando presentan pequeñas cantidades de cloruro, la corrosión ataca principalmente en las zonas que sufrieron tensión durante el proceso de construcción debido a los procesos de soldadura, embutido.

Cuando los depósitos son revestidos con fibras de vidrio se presentan discontinuidades como: grietas, o incluso la no renovación del ánodo del sacrificio (figura 19).



**Figura 19** Corrosión Intercristalina

(García E. M., 1996)

## 2.9 Incrustación

Existen distintos tipos de residuos en un acumulador de agua caliente, ingresa en el depósito materia como arena, barro con el agua de alimentación y se sedimenta en el fondo.

Durante el calentamiento del agua se forma una sedimentación calcárea con menos adherencia debido a la formación de carbonatos durante el ciclo de calentamiento del agua, puede llegar a endurecerse en zona de alto flujo de calor.

La incrustación consiste en un residuo calcáreo adherente que resulta de la nucleación y crecimiento de cristales en las superficies de transmisión de calor. (García E. M., 1996).

El proceso de incrustación tiene una influencia negativa en la vida de los acumuladores, que afecta también a su eficacia, pueden causar los siguientes inconvenientes:

- Ruidos en el acumulador
- Pérdida en la transmisión de calor al agua
- Mayor consumo de energía
- Menor producción de agua caliente
- Menor capacidad útil del acumulador

Se debe realizar tratamientos químicos para contrarrestar el proceso de incrustación tales como ablandadores, y fosfatos.

## **2.10 Normas Aplicables**

### **2.10.1 Historia Código ASME**

El Código para calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), se originó por la necesidad de proteger a la sociedad de las continuas explosiones de calderas que sucedían antes de reglamentar su diseño y construcción.

Métodos de construcción inapropiados, materiales inadecuados, y aumento gradual y excesivo de la presión de operación.

. Este grupo celebra seis reuniones anuales para adaptar el Código. Las ediciones del Código se hacen cada tres años, consta de once secciones en catorce tomos y son:

#### **Sección I**

- Calderas de Potencia

#### **Sección II**

- Especificaciones de Materiales

**Parte A:** Especificaciones de Materiales ferrosos

**Parte B:** Especificaciones de Materiales no ferrosos.

**Parte C:** Especificaciones de materiales de soldadura.

#### **Sección III**

- Plantas de Potencia Nuclear

#### **Sección IV**

- Calderas para Calefacción

#### **Sección V**

- Pruebas no Destructivas

## **Sección VI**

- Reglas Recomendadas para el Cuidado y Operación de Caldera para Calefacción.

## **Sección VII**

- Reglas Sugeridas para el Cuidado de Calderas de Potencia

## **Sección VIII**

- División 1: Recipientes a Presión
- División 2: Reglas para Diferentes Alternativas para recipientes a Presión.

## **Sección IX**

- Requisitos de Soldadura

## **Sección X**

- Recipientes a Presión de Plástico Reforzado y fibra de vidrio.

## **Sección XI**

- Reglas para Inspección en Servicio de Plantas de potencia Nuclear.

### **2.10.2 Alcance código ASME División 1**

La Sección VIII del Código ASME, contiene dos Divisiones, la División 1, que cubre el diseño de los recipientes a presión no sujetos a fuego directo y la División 2, que contiene otras alternativas para el cálculo de recipientes a presión.

Las reglas de la División 1, de esta Sección del Código, cubren los requisitos mínimos para el diseño, fabricación, inspección y certificación de recipientes a presión, además de aquellas que están cubiertas por la Sección I (Calderas de Potencia), Sección III (Componentes de Plantas Nucleares) y Sección IV (Calderas para Calefacción).

### 2.10.3 Limitaciones de la división 1

- La presión deberá ser menor a 3000 psi.
- Calentadores tubulares sujetos a fuego directo.
- Recipientes a presión que son parte integral de componentes de sistemas de tubería
- Sistemas de tuberías.
- Componentes de tubería.
- Recipientes para menos de 454.3 litros (120 galones) de capacidad de agua, que utilizan aire como elemento originador de presión.
- Tanques que suministran agua caliente bajo las siguientes características:
  - Suministro de calor no mayor de 58,600 W (200,000 Btu/h)
  - Temperatura del agua de 99° c (210°f)
  - Capacidad de 454.3 lt (120 galones)
  - Recipientes sujetos a presión interna o externa menor de 1.0055 Kg./cm<sup>2</sup> (15psi)
  - Recipientes que no excedan de 15.2 cm (6 pulg) de diámetro.

### 2.10.4 Formulación Recipientes a presión

#### Presión de diseño (UG-21)

Presión mayor a la de operación 10% o 30 psi el valor que sea mayor, recomendable que se considere también la presión del líquido contenido en el recipiente. (Norma ASME , 2013-2014)

### **Cargas en los recipientes a presión: (UG-22)**

Las cargas a ser consideradas en el diseño de un recipiente deberán ser incluidas de la siguiente forma:

- Presión interna o externa
- Peso del recipiente, y contenido bajo condiciones normales de operación y de prueba.
- Reacciones estáticas superpuestas del equipo adjunto, como motores, maquinaria, otros recipientes, tubería, recubrimientos y aislamientos.
- Soportes internos
- Soportes de los recipientes ,como orejas, anillos , faldas, monturas y piernas
- Reacciones cíclicas o dinámicas debidas a la presión o a las variaciones térmicas, del equipo montado en el recipiente, y las cargas mecánicas.
- Viento, nieve y reacciones sísmicas donde sea necesario.
- Reacciones de impacto debidas a las descargas de un fluido.
- Gradientes de temperatura, diferencial de la expansión térmica.

### **Esfuerzo de tensión (UG-23)**

Es el valor del máximo esfuerzo de presión permitido para diferentes materiales, los mismos están dados en la Subparte1 de la sección II (parte D). Una lista de estos materiales está dada en las siguientes tablas, quienes están incluidas en la sección C. (Norma ASME , 2013-2014)

- TABLA UCS-23 (Aceros al carbono y aceros de baja aleación)
- TABLA UNF-23 (Metales no Ferrosos)
- TABLA UHA-23 (Aceros de alta aleación)
- TABLA UCI-23 (Aceros al carbono y aceros de baja aleación)
- TABLA UCD-23 (Hierro Dúctil)

- TABLA UHT-23 (Aceros Ferrosos con propiedades mejoradas por tratamientos térmicos)
- TABLA ULT-23 (Aceros al níquel para 5%,8% y 9%, Aluminios aleados a temperaturas criogénicas de soldadura, construcciones no soldadas)

### **Esfuerzo de compresión longitudinal**

El máximo esfuerzo de compresión longitudinal deberá ser usado en cuerpos cilíndricos o tubos, ya sea soldado o sin soldadura a tope, cuerpos sujetos a cargas que producen compresión longitudinal, cuyo valor deberá ser el más pequeño de los siguientes valores: (F.Megyesy, 1989)

### **Esfuerzo Longitudinal**

$$S1 = \frac{P * D}{4 * t} \quad (17)$$

### **Esfuerzo Circunferencial**

$$S2 = \frac{P * D}{2 * t} \quad (18)$$

Donde:

**D** = diámetro

**P** = presión interna o externa

**t** = espesor (corrosión admisible excluida)

### **Diseño por presión interna**

#### **Presión de operación**

Es la presión requerida por el proceso, a la cual el recipiente esta normalmente operando. (Norma ASME , 2013-2014)

#### **Presión de diseño**

Recomendable mayor que la de operación 10% o 30 psi lo que sea mayor. (Norma ASME , 2013-2014)

### **Máxima presión admisible**

Es la presión interna a la cual el elemento más débil del recipiente está cargado en su punto máximo permisible y el recipiente se asume en: (Norma ASME , 2013-2014)

- En condición corroída
- Bajo los efectos de la temperatura de diseño
- En posición normal de operación
- Bajo el efecto de todas las cargas.

### **Espesor de cuerpos bajo presión interna (UG-27)**

El espesor de los cuerpos diseñados bajo presión interna no deberán ser menores que los calculados con las siguientes fórmulas, los mismos que deberán ser diseñados por cualquiera de las cargas nombradas en **UG.22**. (Norma ASME , 2013-2014)

Los símbolos se definen como:

**t** = espesor mínimo requerido del cuerpo en (mm)

**P**= presión de diseño interna

**R**= radio interno del cuerpo que está siendo considerado.

**S**= máximo esfuerzo admisible.

**E**= eficiencia de la junta, o la eficiencia de las juntas apropiadas de los cuerpos cilíndricos o esféricos, para recipientes soldados usar la especificación en UW- 12, para ligamentos entre aberturas usar la eficiencia calculada según las reglas UG-53. (Norma ASME , 2013-2014)

### Cuerpos cilíndricos:

El mínimo espesor o la máxima presión de trabajo admisible de cuerpos cilíndricos deberá ser el mayor espesor o la menor presión entre (1) y (2) (Norma ASME , 2013-2014)

#### (1) Esfuerzos Circunferenciales (Juntas Longitudinales)

Cuando el espesor no excede la mitad del radio interno, o P no excede 0.385 SE se aplican las siguientes fórmulas. (Norma ASME , 2013-2014)

$$t = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} \quad (19)$$

$$P = \frac{S * E * t}{R + 0.6 * t} \quad (20)$$

#### (2) Esfuerzos Longitudinales (Juntas Circunferenciales)

Cuando el espesor no excede la mitad del radio interno o P no excede 1.25 SE. (Norma ASME , 2013-2014)

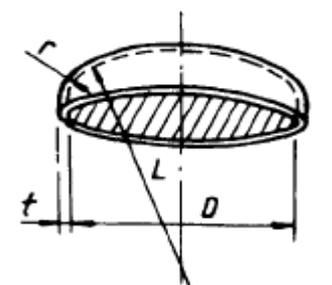
$$t = \frac{P * R}{2 * S * E + 0.4 * P} \quad (22)$$

$$P = \frac{2 * S * E * t}{R - 0.4 * t} \quad (23)$$

### Cabezas en recipientes de presión: (Presión sobre el lado cóncavo)- (UG-32)

El espesor de una cabeza elipsoidal o torriesférica no será en ningún caso menor que el espesor requerido de una cabeza hemisférica dividido para la eficiencia de la junta cabeza-cuerpo. (Norma ASME , 2013-2014)

#### Cabeza torriesférica



**Figura 20.** Cabeza Torriesférica

**Fuente.** (Buthod, 2001)

El espesor requerido para el caso en el que el nudillo del radio sea 6% de la corona interior del radio, y la corona interior del radio igual al diámetro externo de la camisa podrá ser determinado por: (Norma ASME , 2013-2014)

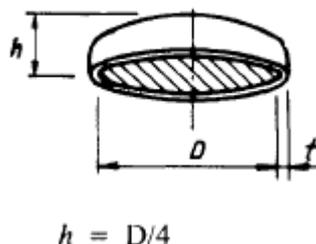
- (Cuando  $L/r \leq 16 \frac{2}{3}$ )

$$t = \frac{0.885 * P * L}{S * E - 0.1 * P} \quad (21)$$

$$P = \frac{S * E * t}{0.885 * L + 0.1 * t} \quad (25)$$

Las cabezas torriesfericas hecha con materiales cuyo esfuerzo mínimo a la tracción es mayor a 70000 psi (483 Mpa) deberán ser diseñadas usando un valor de S igual a 20000 psi (138000 Kpa) a temperatura ambiente y reducida en la proporción del valor del máximo esfuerzo admisible a la temperatura del material. (Norma ASME , 2013-2014)

## Cabeza Elipsoidal



**Figura 21.** Cabeza Elipsoidal

**Fuente.** (Buthod, 2001)

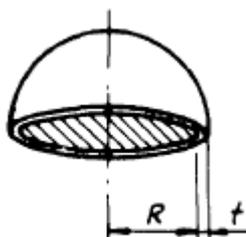
El espesor de la cabeza elipsoidal en que la mitad del eje menor es igual a un cuarto del diámetro interno de la cabeza de la camisa será determinado por: (Norma ASME , 2013-2014)

$$t = \frac{P * D}{2 * S * E - 0.2 * P} \quad (26)$$

$$P = \frac{2 * S * E * t}{D + 0.2 * t} \quad (27)$$

Una aproximación aceptable de un 2: 1 cabeza elipsoidal es con un radio de nudillo de 0.17 D y un radio esférico de 0.90D.

## Cabeza Hemiesférica:



**Figura 22.** Cabeza Hemiesférica

**Fuente.** (Buthod, 2001)

Cuando el espesor de una cabeza hemisférica no excede el valor de  $0.356L$ , o  $P$  no exceda  $0.665 SE$ , se aplicarán las siguientes fórmulas (Norma ASME , 2013-2014)

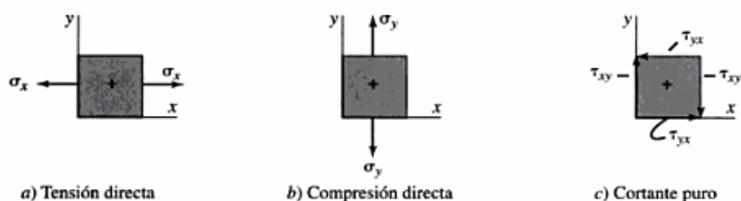
$$t = \frac{P * L}{2 * S * E - 0.2 * P} \quad (22)$$

$$P = \frac{2 * S * E * t}{L + 0.2 * t} \quad (23)$$

## 2.11 Mecánica de Materiales

### 2.11.1 Tensión:

Es la fuerza de tensión por unidad de área, cuando una pieza esté sujeta a fuerzas los esfuerzos se distribuyen variablemente dentro del material. A estos esfuerzos se los modela cada uno como un cubo ya que cada elemento infinitesimal dentro del material puede presentar al mismo tiempo esfuerzos distintos (figura 23).



**Figura 23.**Representación de esfuerzos

**Fuente** (L.Mott, 2006)

Los esfuerzos normales  $\sigma$  actúan de forma perpendicular y los esfuerzos cortantes paralelos a las caras del cubo y estos tienden a distorsionar el cubo de forma romboidal.

### 2.11.2 Deformación

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo este tiende a cambiar su forma y tamaño a este cambio se le conoce como deformación. Un cuerpo puede deformarse cuando la temperatura del cuerpo cambia. Mediante la ley de Hooke, un material que está en la etapa elástica su esfuerzo y deformación se relacionan linealmente. Existen dos tipos de deformaciones tanto la deformación normal o perpendicular  $(\epsilon_x, \epsilon_y)$  como la producida debido a esfuerzos de torsión  $(\epsilon_{xy}, \epsilon_{yx})$ .

#### 2.11.2.1 Deformación Unitaria.

Es la relación entre la deformación total y la longitud inicial del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión.

Las deformaciones unitarias normales causan un cambio en el volumen, las deformaciones unitarias causan un cambio en su forma.

$$\epsilon = \frac{L_f - L_o}{L} \quad (24)$$

#### 2.11.3 Ley de Hooke

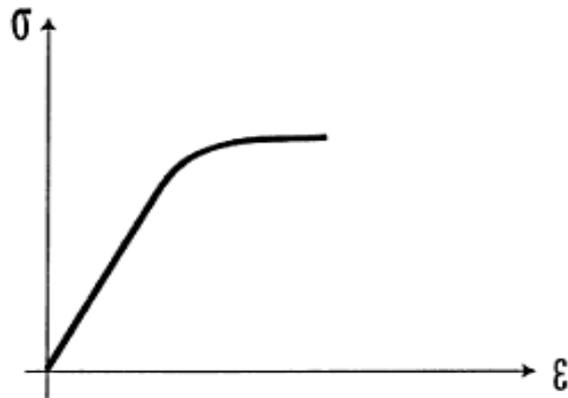
Es la ley que relaciona fuerzas y deformaciones, la cual señala que el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria como se muestre en la figura 24.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (25)$$

Donde:

**E:** Módulo de Young que mide la resistencia de un material a la deformación elástica.

**$\epsilon$ :** Deformación unitaria



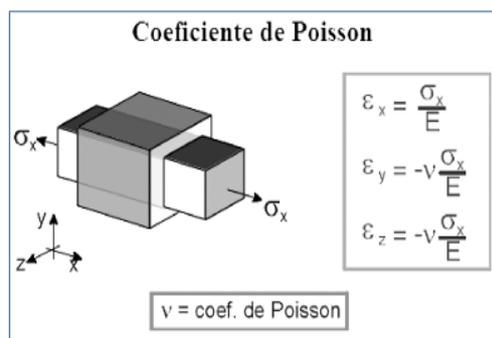
**Figura 24.** Esfuerzo vs Deformación

Fuente (Trujillo, 2007)

#### 2.11.4 Coeficiente de Poisson

Constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de un material elástico lineal e isotrópico cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza perpendicularmente (figura 25).

$$\mu = \frac{\text{deformación unitaria lateral}}{\text{deformación unitaria axial}} \quad (26)$$



**Figura 25.** Esquema coeficiente de Poisson material isotrópico

Fuente. (Moreno, 2007)

### 2.11.5 Cilindro de pared delgada

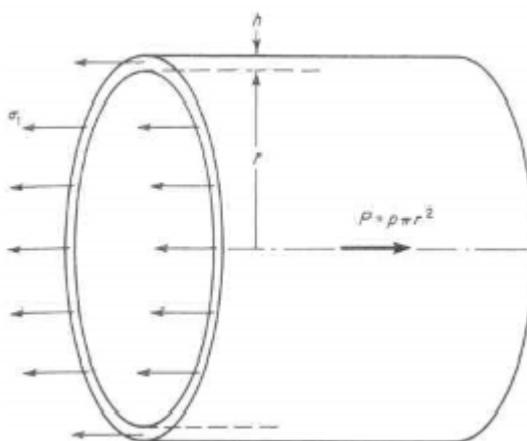
Es cuando existe una gran diferencia entre el espesor y el diámetro del mismo, la distribución de esfuerzos en el espesor de las paredes del cilindro de pared delgada es uniforme, estos cilindros deben cumplir la siguiente relación.

$$\frac{di}{t} > 40 \quad (27)$$

#### 2.11.5.1 Esfuerzos en un cilindro de pared delgada

En los recipientes de pared delgada se puede hacer un importante análisis del esfuerzo plano, ya que sus paredes oponen poca resistencia a la flexión se puede decir que estas fuerzas son tangentes a la superficie

Se determina los esfuerzos ejercidos sobre una pequeña porción de pared, en este caso no se ejerce esfuerzos cortantes sobre el elemento debido a la simetría axial del recipiente (Figura 26)



**Figura 26** . Esfuerzos en cilindros de pared delgada

**Fuente.** (Moreno, 2007)

En los cilindros de pared delgada el esfuerzo radial es pequeño en relación con el esfuerzo circunferencial

### Esfuerzo transversal

Este esfuerzo es la cara que resiste la fuerza que tiende a separar las dos mitades de un tramo de longitud unitaria de un cilindro y está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma T = \frac{P_i * r_i}{2 * t} \quad (28)$$

$$\sigma T = \frac{E}{1 - \mu^2} * (\varepsilon L + \mu \varepsilon T) \quad (29)$$

### Esfuerzo longitudinal

Es el esfuerzo que se debe a la presión ejercida en los fondos o cabeza de cilindro y está dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma L = \frac{P_i * r_i}{4 * t} \quad (30)$$

$$\sigma L = \frac{E}{1 - \mu^2} * (\varepsilon T + \mu \varepsilon L) \quad (31)$$

Donde:

**P<sub>i</sub>**: Presión interna en el cilindro

**r<sub>i</sub>**: radio interior

**t**: espesor pared cilindro

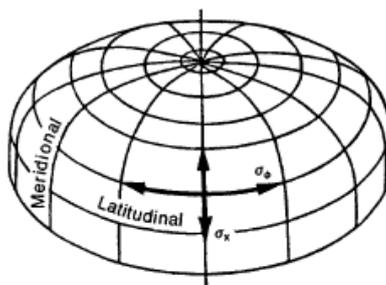
**ε<sub>T</sub>**: deformación unitaria transversal

**ε<sub>L</sub>**: deformación unitaria longitudinal

**μ**: coeficiente de Poisson

### 2.11.6 Esfuerzos cabeza elipsoidal debido a presión interna

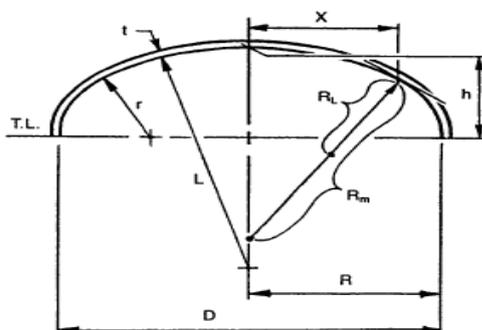
En la cabeza elipsoidal de un recipiente a presión existen esfuerzos a lo largo del eje meridional y latitudinal como se observa en la figura 27.



**Figura 27.** Dirección de los esfuerzos en una cabeza de un recipiente

**Fuente.** (Moss, 2004)

Las dimensiones para el estudio de los esfuerzos en una cabeza elipsoidal se detallan en la figura 28



**Figura 28.** Dimensiones cabeza elipsoidal

**Fuente.** (Moss, 2004)

Los esfuerzos son de distinta magnitud dependiendo la zona de la cabeza que se esté estudiando donde el esfuerzo máximo se da en la corona o parte superior, y el esfuerzo mínimo en la parte inferior.

Las siguientes ecuaciones evalúan los esfuerzos a una distancia (x) del centro de la cabeza elipsoidal.

**Esfuerzo en el eje meridional de la cabeza**

$$\sigma_x = \frac{P * R_L}{2 * t} \quad (32)$$

**Esfuerzo en el eje latitudinal de la cabeza**

$$\sigma_\phi = \frac{P * R_L}{t} \left( 1 - \frac{R_L}{2 * R_m} \right) \quad (33)$$

Donde:

$$R_L = \sqrt{\frac{R^4}{h^2} + x^2 \left( 1 - \frac{R^2}{h^2} \right)}$$

$$R_m = \frac{R_L^3 h^2}{R^4}$$

$R_L$ : Radio Latitudinal de curvatura

$R_m$ : Radio meridional de curvatura

$R$ : Radio cabeza

$h$ : Altura cabeza

$t$ : espesor de la cabeza elipsoidal

**Dilatación Radial en un recipiente sometido a presión**

Cuando el acumulador está expuesto a una presión interna existe un crecimiento radial la cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\delta = r * \left( \frac{\text{Esfuerzo Transversal}}{E} - \mu * \frac{\text{Esfuerzo Longitudinal}}{E} \right) \quad (34)$$

### Dilatación cabeza acumulador

La dilatación en las cabezas elipsoidales está dada por la ecuación:

$$\delta = \frac{p * R^2}{t * E} \left( 1 - \frac{R^2}{2 * h^2} - \frac{u}{2} \right) \quad (35)$$

#### 2.11.7 Medida de deformación galgas extensiométricas

Mediante las galgas extensiométricas se puede medir la deformación de un material, mediante el efecto piezoresistivo , ya que algunos materiales tienen la propiedad de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se somete a esfuerzos , esta variación se da por el cambio de longitud , en la sección o en la resistividad , las galgas hacen lecturas directas sobre las deformaciones.

Existen dos tipos de galgas extensiométricas:

##### **Galgas cementadas:**

Formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico. (Creus, 2011)

##### **Galgas sin cementar:**

Donde los hilos de resistencia descansan sobre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial. (Creus, 2011).

## CAPÍTULO III

### DISEÑO DEL ACUMULADOR

#### 3.1 Procedimiento de cálculo

Los tanques de almacenamiento que están sometidos a presión interna se diseñan según la norma ASME. Los datos principales para realizar el diseño del acumulador son los siguientes:

##### 3.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO:

**Presión de operación:** 200 Psi

**Temperatura de diseño:** 45° C tomando en cuenta que el suministro de agua es para zonas residenciales o comerciales el agua se almacena aproximadamente a 45°C. (Benito, 2012)

**Capacidad del Acumulador de ACS:** la capacidad escogida para nuestro acumulador es de 140 litros, que serviría para una familia de cuatro personas, como se indica en la tabla 2 dependiendo del consumo diario de agua caliente sanitaria por usuario

**Tabla 2**

Referencia de consumo de agua caliente por usuario y día

<b>Espacio</b>	<b>Litros/Día</b>
<b>Vivienda unifamiliar</b>	30
<b>Hospital</b>	55
<b>Escuelas</b>	3
<b>Cuarteles</b>	20
<b>Restaurantes</b>	5-10

**Fuente** (Benito, 2012)

**Material:** Se utiliza acero inoxidable AISI 304 porque se va almacena agua para consumo humano, no produce efectos nocivos para la salud.

**Corrosión Admisible (CA):** La corrosión es de naturaleza superficial según manda la norma **UG-25** no es necesario adicionar espesor por corrosión. Por esta razón se asume un espesor adicional admisible de 0 (in), el Acumulador únicamente estará en contacto con el agua, el acero inoxidable tiene gran resistencia a la corrosión.

**Esfuerzo Permisible a 45 °C (Temperatura de diseño):** 18670 Psi (PressureVesselHandbook - Anexo 3 Propiedades de los materiales)

**S (Eficiencia de la Junta)=** 0.85 radiografiado por puntos

**Diámetro recipiente =** para optimizar el material se realiza el siguiente cálculo.

**Plancha acero inoxidable AISI 304 =** 1.22\*1.22 m

$$D = \frac{1.22}{\pi} \quad (36)$$

$$D = 0.38 \text{ m} \approx 15 \text{ pulg}$$

**Presión de diseño:** 10% o sumarle 30 Psi a la presión de operación lo que sea más grande.

$$Pd = Po + 30 + \text{Peso columna de líquido} \quad (37)$$

$$\text{Peso columna líquido} = 0.433 * D = 0.54 \text{ Psi} \quad (38)$$

$$Pd = 200 + 30 + 0.54 = 230.54 \text{ Psi}$$

### 3.1.2 Diseño mecánico

#### Cálculo espesor de la placa del cuerpo:

##### 3.1.2.1 Diseño por presión interna cuerpo cilíndrico

Según el párrafo UG-27 de la norma ASME se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del esfuerzo de un cilindro

- Se utiliza la ecuación **(20)** para el cálculo de los espesores.

$$D = 14,72 \text{ in}$$

$$Pd = 230.54 \text{ psi}$$

$$R = 7.36 \text{ in}$$

$$S = 18670 \text{ psi}$$

$$e = 0.85$$

$$t = \frac{Pd * R}{S * E - 0.6 * Pd}$$

$$t = 0.107 \text{ in}$$

Escogemos el espesor del cuerpo de 0,118 in (3 mm)

##### 3.1.2.2 Diseño por presión interna cabeza elipsoidal

Se escogió este tipo de cabezas ya que las mismas soportan mayor presión, tienen una relación 2:1: Se utiliza la ecuación **(25)** detalla en el párrafo UG-32 de la norma ASME.

$$t = \frac{Pd * D}{2 * S * E - 0.2 * Pd}$$

$$t = 0.107 \text{ in}$$

Igual que el cuerpo se escoge un espesor de 0,118 in (3 mm).

### 3.1.2.3 Dimensionamiento del acumulador de acs

$$h_{cab} = \frac{D}{4} \quad (39)$$

$$h_{cab} = 0.094 \text{ m}$$

$$V_{cabelipsoidal} = \frac{\pi * D^2 * h_{cab}}{6} \quad (40)$$

$$V_{cabelipsoidal} = 0.0068 \text{ m}^3$$

$$V_{cuerpo} = V_{acumulador} - 2 * V_{cabelipsoidal} \quad (41)$$

$$V_{cuerpo} = 0.14 - 2 * 0.0068 = 0.126 \text{ m}^3$$

$$h_{cuerpo} = \frac{V_{cuerpo} * 4}{\pi * D^2} \quad (42)$$

$$h_{cuerpo} = 1.110 \text{ m}$$

$$h_{total} = h_{cuerpo} + h_{cabezas} = 1.30 \text{ m}$$

Para aplicaciones de agua caliente sanitaria de ACS es necesario que se cumpla la siguiente condición:

$$50 < \frac{V}{A} < 180 \quad (43)$$

**V:** Volumen del acumulador en litros

**A:** Área total de los captadores solares

### 3.1.2.4 Aberturas

El acumulador de agua caliente sanitaria tendrá 8 aberturas de forma circular de ½ in de diámetro para las tuberías que son utilizadas para la circulación de agua para uso humano y una abertura de 1 ½ in que sirve para la limpieza y desagüe del recipiente.

**N1:** Entrada de producto

**N2:** Salida de producto

**N3:** Entrada agua al colector

**N4:** Retorno agua al colector

**N5:** Válvula de Alivio

**N6:** Conexión para manómetro

**N7:** Conexión para termómetro

**N8:** Desagüe

De acuerdo con la norma ASME sección VIII división 1 las boquillas menores de 3 ½ in de diámetro con un espesor de pared no mayor a 3/8 in, no necesitarán instalar una placa de refuerzo en la unión del cuello de la boquilla con el recipiente.

### 3.1.2.5 Cálculo tuberías

**Diseño por presión externa:**

**Tubería ½ in**

$$t = \frac{Pd * R}{2 * S * E + 0.4 * Pd} \quad (44)$$

$$t = \frac{230.54 * (0.25)}{2 * 18670 * 0.85 + 0.4 * 230.54}$$

$$t = 1.81 * 10^{-3} \text{ in}$$

**Tablas de pesos de tuberías (PressureVesselHandbook - Anexo 3**  
Propiedades de los materiales)

Designación Estándar (**STD**)

Espesor de pared tubería = 0.083 in

### 3.1.2.6 Selección de bridas para boquillas

Según Norma ASME las boquillas de ½ in de diámetro deben ser instaladas por medio de coples roscados, para lo cual se eligió neoplos de ½ pulg \* 10 cm de acero inoxidable.

### 3.1.2.7 Tratamiento térmico en cuerpo y cabezas

Según la tabla UG-71-1 citada en la norma ASME se tiene las siguientes ecuaciones para calcular el porcentaje de alargamiento de fibra dependiendo si el proceso de construcción del recipiente y sus cabezas se lo realizo con simple o doble conformado.

#### Alargamiento Fibra Cuerpo

$$\% = \frac{50 * t}{Rf} * \left(1 - \frac{Rf}{Ro}\right) = 0.733 \quad (45)$$

$$\% = 0.733$$

#### Alargamiento Fibra Cabezas

$$L = 0.90 * Di = 0.90(15 - 2 * 0.118) = 13.28 \text{ in}$$

$$R = 0.17 * Di = 0.90(15 - 2 * 0.118) = 2.50 \text{ in}$$

### Primer conformado

$$R0 = \infty$$

$$Rf = 13.28 \text{ in}$$

$$\% = \frac{75 * 0.118}{13.28} = 0.66$$

### Segundo conformado

$$Rf = 13.28 \text{ in}$$

$$R0 = 2.50 \text{ in}$$

$$\% = \frac{75 * 0.118}{13.28} * \left(1 - \frac{2.50}{13.28}\right) = 0.54 < 5\% \text{ No necesita tratamiento térmico}$$

### 3.1.2.8 Presión de prueba hidrostática

La presión de prueba hidrostática debe ser 1.3 veces mayor a la máxima presión de trabajo, según párrafo **(UG-99)** de norma ASME.

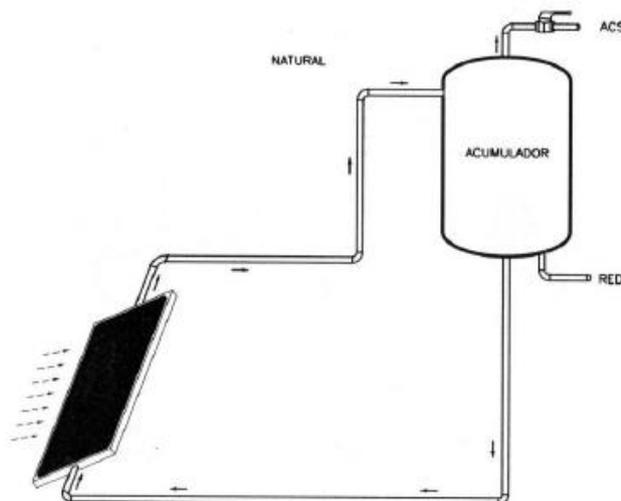
$$P_{pruebahidr} = 1.3 * (MAWP \text{ o } Pd) * \frac{S(\text{prueba})}{S(\text{diseño})} \quad (46)$$

$$P_{pruebahidrostática} = 300 \text{ Psi}$$

### 3.1.3 Diseño térmico

#### 3.1.3.1 Configuración básica del circuito de circulación

El circuito de circulación del agua (figura 29), en la instalación solar es por convección natural, también denominado termosifón, en este proceso el movimiento del fluido se produce debido al cambio de densidad del fluido ocasionado por un gradiente de temperatura, ya que el fluido del colector se calienta, y asciende al pesar menos, por lo tanto el fluido frío se desplaza a la parte baja provocando la circulación natural.



**Figura 29.** Circulación natural

(Juan Carlos Martínez, 2013)

#### 3.1.3.2 Selección aislante térmico del acumulador de acs

El aislamiento térmico nos permite conservar la energía dentro del acumulador de agua, por medio del mismo nuestro sistema será más eficiente, para realizar la selección del aislante adecuado se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

Tabla 3.

Aspectos de aislante térmicos.

Parámetros	Laminas rígidas, placas y preformadas	Lana Mineral	Espumas
Costo	\$ 210	\$ 168	\$440
Montaje	Medio	Fácil	Medio
Conductividad térmica W/m-K	0,040	0,038	0,044
Resistencia térmica m2.K/W	1,316	1,674	1,142
Disponibilidad Mercado	Si	Si	Si
Mantenimiento	Si	No	Si
Rango de temperatura °C	Hasta 750	Hasta 750	Hasta 750
Absorción de Humedad	Baja	Baja	Media

Tabla 4.

Matriz de decisión de aislante térmico

PARÁMETROS	%	ALTERNATIVAS		
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
<b>ASPECTOS TÉCNICOS</b>	<b>50</b>			
Conductividad térmica	15	12	14	12
Rango de temperatura.	10	8	8	8
Baja absorción de humedad	5	4	4	3
Facilidad de mantenimiento.	5	4	5	3
Resistencia Mecánica	15	12	15	12
<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>	<b>40</b>			
Disponibilidad de materiales en el mercado.	30	25	28	22
Costo de montaje.	10	6	8	6
<b>ASPECTOS VARIOS</b>	<b>10</b>			
Disponibilidad de espacio.	10	6	8	6
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>77</b>	<b>90</b>	<b>72</b>

Como se observa en la matriz de selección de la tabla 4, la segunda alternativa lana mineral es la más adecuada para el desarrollo del proyecto debido a las necesidades del mismo.

### **Propiedades aislante térmico**

- Conductividad
- Resistencia del material al paso de calor

Cuanto menor sea el valor de la conductividad se tiene una mayor capacidad del aislante, y por lo contrario cuanto mayor sea la resistencia mayor capacidad aislante tiene el material.

Para el acumulador de agua caliente sanitaria se escogió lana mineral por los siguientes aspectos: **(Ver anexo 1)**



**Figura 30.**Lana Mineral

(Benito, 2012)

### **Propiedades:**

**Conductividad Térmica:**  $0.039 \text{ W/m}^\circ\text{k}$

**Densidad nominal:**  $100 \text{ kg/m}^2$

## Ventajas

- Adecuada para aplicaciones de trabajo pesado que están expuestas a altas temperatura
- Resistencia a altas temperaturas
- Flexible aplicación
- Disponibles en varios espesores
- Adecuadas para el uso sobre acero inoxidable

### 3.1.3.3 Espesor aislante térmico

En base al cálculo que se detalla a continuación se determina el espesor adecuado de aislante para el acumulador

#### Coefficiente convectivo exterior

$$Re = \frac{\rho * v * De}{u}$$

$$Re = \frac{1.24 \frac{kg}{m^3} * 0.8 m/s * 0.380m}{1.778 * 10^{-5} Pa.s} = 21201,3$$

(47)

$$Nu = C * Re^m * Pr^{0.333}$$

$$Nu = 0.193 * 21201,3^{(0.618)} * (0.7336)^{0.333}$$

$$Nu = 82,19$$

$$h_2 = 82,19 * \frac{0.024}{0.380} = 5,18 \frac{W}{m * ^\circ K}$$

Si se tiene la conductividad térmica del aislante y el coeficiente de convección exterior el espesor del aislante se puede calcular con la siguiente expresión:

$$r_{aisl} = \frac{k}{h} = \frac{0.039 \frac{W}{m^{\circ}C}}{5,18 \frac{W}{m^2^{\circ}C}} = 0.007 \text{ m}$$

El espesor del aislante es de 7 mm, pero cualquier aumento de aislante disminuiría la pérdida de calor en el acumulador, y debido a que también el espesor recomendado para este tipo de aplicaciones es de 50 mm se escoge éste espesor para mayor seguridad.

### 3.1.3.4 Cálculo energía aprovechable de los colectores solares

Es necesario calcular la energía neta captada por los colectores solares dependiendo de su área de captación, para poder conocer si el aislamiento térmico escogido es adecuado para minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior.

$$E_{netacap} = 0.94 * k * H \quad (48)$$

Existen varios aspectos de los cuales depende ésta energía:

**H:** irradiación que incide sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio de cada mes en un lugar determinado.

**K:** un factor que depende de la latitud del lugar e inclinación del colector.

Se debe tomar en cuenta que durante el día y la noche existen horas en las cuales la radiación del sol no es suficiente para calentar el fluido y que el mismo comience a circular, definiremos a esto como radiación umbral que toma un valor de  $200 \text{ W/m}^2$ .

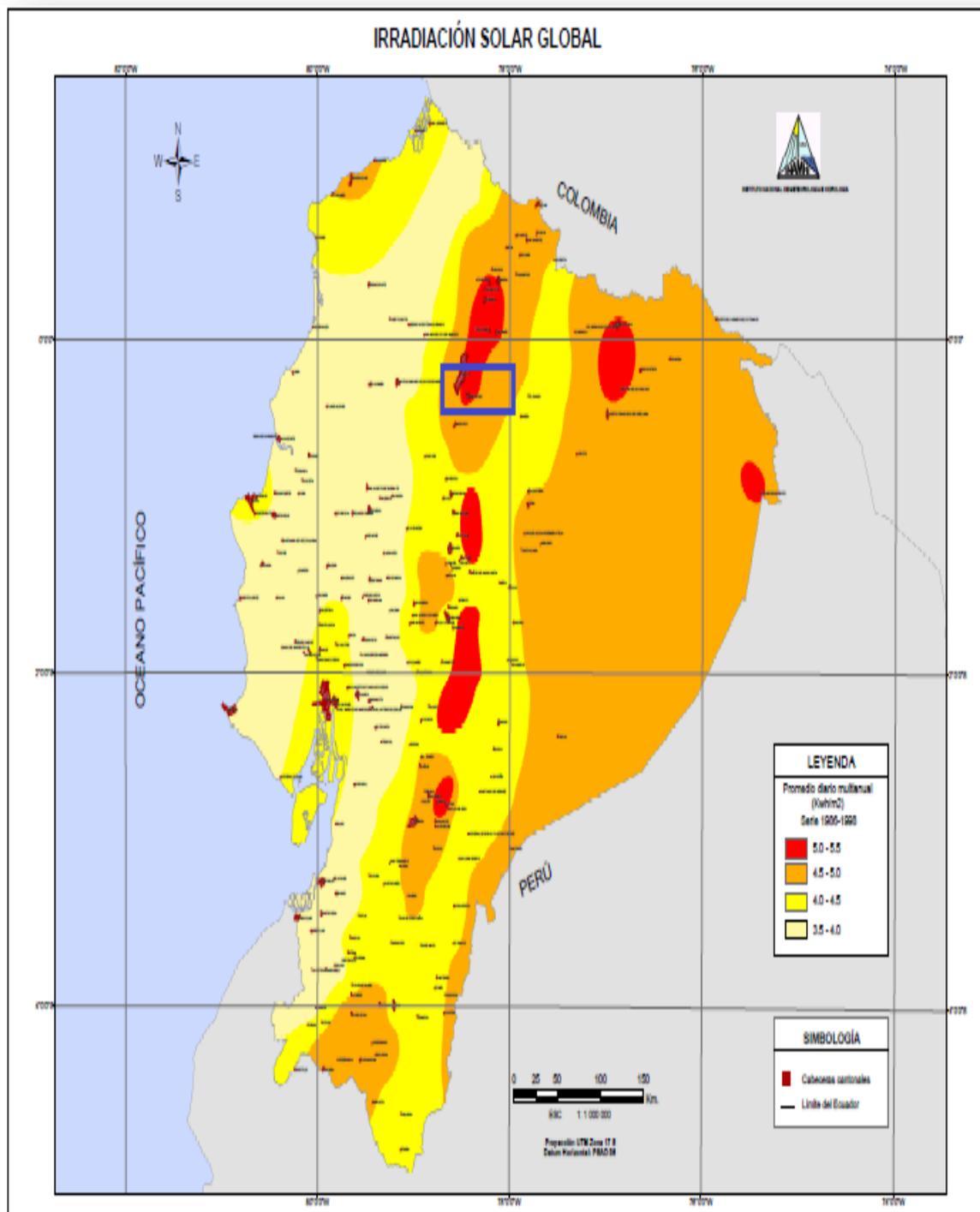
Para sistemas de aprovechamiento solar térmico existe un valor de corrección que equipara las pérdidas cuando la radiación solar está por

debajo del umbral que son aproximadamente del 6 % por lo cual se multiplica por un valor del 0.94.

En Sangolquí, que es el lugar donde se va a instalar el acumulador de ACS el valor de la irradiación promedio diaria multianual es:

$$H = 5 \text{ Kw.h/m}^2 \text{ o } 18 \text{ MJ/m}^2.$$

Dato obtenido de la figura 31 proporcionada por el servicio meteorológico del gobierno.



**Fuente.** (<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>, s.f.)

**Figura 31** Valores de Irradiación en Ecuador

**Tabla 5.**

Factores de corrección irradiación solar

Coeficiente de corrección	Situación lugar
1.05	Limpio de contaminación (montañas)
1	Normal Contaminación
0.95	Lugares con contaminación (ciudades)

**Fuente.** (Araujo, 2005)

$$H_{\text{corregida}} = 0.95 * 18 \text{ MJ} = 17.1 \text{ MJ} \quad (49)$$

Por estar situado nuestro acumulador en una ciudad, Sangolquí se optó por el valor de 0.95. El valor de **H** está en función de la incidencia de la radiación sobre una superficie horizontal, pero al estar los colectores inclinados se tiene un factor de corrección K.

**Tabla 6**

Ángulos de inclinación

Período de utilización	Ángulo de inclinación
Anual con consumo constante	Latitud del lugar
Consumo en invierno	Latitud del lugar +10°
Consumo en verano	Latitud del lugar -10°

**Fuente.** (Araujo, 2005)

$$\text{Latitud Sangolquí} = -0.33^\circ$$

Los colectores solares se encuentran a una inclinación de 40°.

$$\text{Latitud} = 0^\circ$$

**Tabla 7**

Valores de K en Ecuador

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.98	0.9	0.8	0.68	0.57	0.53	0.56	0.66	0.79	0.91	0.99	1.01

Fuente. (Araujo, 2005)

$$E_{netacap} = 0.94 * K_{prom} * H_{corregida} \quad (50)$$

$$E_{netacap} = 0.94 * 0.78 * 17.1 = 12.53 \text{ MJ/m}^2$$

El área de captación del colector de este sistema es  $2.75 \text{ m}^2$

$$E_{total} = A_{cap} * E_{netacap} \quad (51)$$

$$E_{total} = 2.75 \text{ m}^2 * 12.53 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} = 34.45 \text{ MJ}$$

### 3.1.3.5 Intensidad radiante

HSP = 9 horas en la zona ecuatorial

$$E_{neta} = \frac{E_{total}}{HSP} \quad (52)$$

$$E_{neta} = 1063.27 \text{ W.}$$

### 3.1.3.6 Calor máximo cedido al ambiente

El calor máximo cedido del tanque hacia el ambiente no debe superar el 10 % de la energía captada por los colectores solares ya que las tuberías de conducción caliente deberán perder una potencia menor al 10% del total de la energía captada.

$$\text{Calor máx} = 0.10 * E_{neta} \quad (53)$$

$$\text{Calor máx} = 106.32 \text{ W}$$

### 3.1.3.7 Determinación caudal del captador solar

Los caudales de las instalaciones solares establecen la capacidad de evacuación del calor desde el sistema de captación hasta el consumo.

Existe un caudal óptimo promedio, normalmente de 25 lt/h por metro cuadrado de área de colectores dependiendo de las características de la instalación, para el cual el rendimiento alcanza un valor máximo. (Juan Carlos Martínez, 2013)

Utilizar el caudal óptimo tiene el riesgo de que cualquier error pueda reducir drásticamente el rendimiento de la instalación. Se recomienda seleccionar un caudal por encima del óptimo pero no muy alejado. Como el óptimo para cada caso habría que determinarlo por un proceso de análisis y simulación completa de la instalación, que no siempre se puede hacer, se recomienda adoptar valores del lado de la seguridad entre 30 lt/h y 60 lt/h por metro cuadrado, siendo habitualmente más utilizados los valores entre 40 lt/h y 50 lt/h por metro cuadrado de captación (Juan Carlos Martínez, 2013)

$$\text{Caudal} = 50 \frac{\text{lt}}{\text{h}} * 2.75 = 137.5 \frac{\text{lt}}{\text{h}}$$

### 3.1.3.8 Pérdidas de calor desde el acumulador hacia el ambiente

El acumulador de agua caliente sanitaria va a perder calor hacia los alrededores, por conducción, convección y radiación.

**Propiedades del agua a 45 °C** (Tablas transferencia de calor Yanus Cengel)

$$c_p = 4180 \frac{J}{kg^{\circ}C}$$

$$K = 0.65 \frac{W}{m^{\circ}k}$$

$$\rho = 990.22 \frac{kg}{m^3}$$

$$u = 6.04 * 10^{-4} Pa.s$$

### **Coeficiente convectivo interior**

El acumulador es considerado como una tubería en cuyo interior circula agua en régimen laminar.

$$Q = A * V \quad (54)$$

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * \emptyset^2} \quad (55)$$

$$V = \frac{4 * (3.81 * 10^{-5} m^3 / s)}{\pi * (0.374 m)^2} = 3.46 * 10^{-4} m/s$$

$$Re = \frac{\rho * v * D}{u} \quad (56)$$

$$Re = \frac{990.22 \frac{kg}{m^3} * 3.46 * 10^{-4} m/s * 0.374 m}{6.04 * 10^{-4} Pa.s} = 212,14$$

Se puede observar que en realidad el agua que circula al interior del recipiente se encuentra en flujo laminar

$$Re < 2300$$

Cuando circula agua con flujo a calor constante a través de una tubería el número de Nusselt se aproxima a 4 por medio de la ecuación (3) se tiene:

$$h = \frac{k * Nu}{D}$$

$$h_1 = \frac{(0.65 \frac{W}{m^{\circ}K} * 4)}{0.38 m} = 6.84 \frac{W}{m^2 \circ K}$$

### **Pérdidas de calor por conducción en el cuerpo del acumulador**

#### **Resistencias térmicas**

**Propiedades materiales** (Tablas transferencia de calor Yanus Cengel)

$$T_{\infty 1} = 45 \text{ }^{\circ}C$$

$$T_{\infty 2} = 11 \text{ }^{\circ}C \text{ (Temperatura media ambiental anual)}$$

#### **Conductividad térmica:**

##### **Acero Inoxidable:**

$$K = 16.3 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

##### **Lana Mineral:**

$$K = 0.039 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

#### **Radios:**

$$r_1 = 0.187 m \text{ (Radio Interno ACS Acero inoxidable)}$$

$$r_2 = 0.19 m \text{ (Radio Externo ACS Acero inoxidable)}$$

$$r_3 = 0.24 m \text{ (Radio Lana Mineral)}$$

$r_4 = 0.241$  m (Radio Carcaza)

**Áreas:**

$L = 1.42$  m (Longitud total acumulador incluido la lana mineral)

$$A_1 = 2 * \pi * r_1 * L \quad (57)$$

$$A_1 = 2 * \pi * r_1 * L = 2 * \pi * 0.187 * 1.42 = 1.66 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2 * \pi * r_4 * L = 2 * \pi * 0.241 * 1.42 = 2.15 \text{ m}^2$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A} \quad (58)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * k_1 * L} \quad (59)$$

$$R_{1_{conv}} = \frac{1}{h_1 * A_1} = 0.088 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{1_{cond\_acero}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * k_1 * L} = 1.09 * 10^{-4} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{2_{cond\_lana}} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * k_2 * L} = 0.70 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{3_{cond\_carcaza}} = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 * \pi * k_2 * L} = 0.012 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{2_{conv}} = \frac{1}{h_2 * A_2} = 0.09 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$RT = R_{1_{conv}} + R_{1_{cond\_acero}} + R_{2_{cond\_lana}} + R_{3_{cond\_carcaza}} + R_{2_{conv}}$$

$$RT = 0.89 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{RT}$$

$$Q_{\text{condcuerp}} = \frac{45^{\circ}\text{C} - 11^{\circ}\text{C}}{0.89} = 38.2 \text{ W}$$

### Pérdidas de calor por conducción en las cabezas del acumulador

Se utiliza de igual manera el método de las resistencias térmicas para calcular las pérdidas de calor en las cabezas del acumulador.

Debido a que las tapas del acumulador son superficies planas con poca curvatura se utiliza la siguiente fórmula de resistencia eléctrica.

$$R = \frac{e}{K * A} \quad (60)$$

Donde A es el área de la tapa de la carcasa del acumulador:

$$A = \pi * r^2 = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (61)$$

$$A = \pi * (0.241)^2 = 0.182 \text{ m}^2$$

$$R1 = \frac{1 * 10^{-3}}{(16.3) * (0.182)} = 3.37 * 10^{-4} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R2 = \frac{0.05}{(0.039) * (0.182)} = 7.04 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R3 = \frac{3 * 10^{-3}}{(16.3) * (0.182)} = 1.01 * 10^{-3} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Como se tiene dos tapas se multiplica la resistencia para saber el valor total del calor perdido en las cabezas.

$$RT = 7.041 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} * 2 = 14.082 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$Q_{\text{condcab}} = \frac{45^{\circ}\text{C} - 11^{\circ}\text{C}}{14.082} = 2.14 \text{ W}$$

### Pérdidas de calor por radiación en el acumulador

El cálculo de las pérdidas se realiza mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A_t * (T_s^4 - T_a^4) = 10.47 \text{ W} \quad (62)$$

$$A_t = \pi * r * L = \pi * 0.482 * 1.30 = 1.96$$

$$Q_{\text{rad}} = 0.20 * (5.8 * 10^{-8}) * 1.96(287^4 - 284^4) = 6.34 \text{ W}$$

Para saber el calor perdido por el acumulador se suma las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

$$Q_{\text{total}} = 38.2 \text{ W} + 2.14 \text{ W} + 6.34 \text{ W} = 47 \text{ W}$$

El calor perdido es de 47 W que es menor al calor máximo a ser transferido por lo cual el espesor del aislante es el adecuado.

### 3.1.4 Diseño hidráulico

#### 3.1.4.1 Caudal tuberías de conexión

El diámetro de las tuberías se selecciona de forma que la velocidad de circulación sea inferior a 2 m/s cuando la tubería sea para locales habitados y 3 m/s cuando el trazado sea al exterior y por locales no habitados.

#### Tubería comercial de ½ in

Material Polipropileno

$$\varnothing_{\text{int}} = 14.5 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = 2.76 * 10^{-3} \text{ m}$$

El fluido que circula es agua a 45°C:

$$\rho = 990.22 \frac{kg}{m^3}$$

$$u = 6.04 * 10^{-4} Pa.s$$

Se debe verificar que la velocidad del fluido sea:

$$Q = 137.5 \frac{lt.s}{h} = 3.81 * 10^{-5} m^3 / s$$

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * \phi^2}$$

$$V = \frac{4 * (3.81 * 10^{-5} m^3 / s)}{\pi * (0.0145)^2} = 0.23 m/s$$

La velocidad es menor a 2 m/s que es lo mandatorio para locales habitados.

### 3.1.4.2 Pérdidas De Carga Tuberías De Conexión

El dimensionamiento de las tuberías hay que realizarlo de manera que las pérdidas de carga nunca sean mayores a 40 mm de columna de agua por metro lineal.

$$pc = 6.819 \left( \frac{v}{145 m/s} \right)^{1.852} * di^{-1.167} \quad (63)$$

$$pc = 6.819 \left( \frac{0.23 m/s}{145 m/s} \right)^{1.852} * 0.0145^{-1.167}$$

$$pc = 6.22 mm.ca < 40 mm.ca$$

El diámetro de la tubería es el apropiado para la interconexión del tanque acumulador y los captadores solares.

### 3.1.4.3 Pérdidas de calor tuberías de conexión

Todas las tuberías accesorios y componentes se aislarán para evitar pérdidas térmicas en el circuito de circulación.

El cálculo de los niveles de aislamiento se realiza de manera que las pérdidas térmicas no superen el 10% de la potencia que transporta.

Los espesores mínimos de aislamiento de las redes de tuberías de agua caliente sanitaria deben ser los indicados en la siguiente tabla aumentados en 5 mm.

**Tabla 8.**

Aislamiento térmico para tuberías

<b>Diámetro Tubería</b>	<b>Espesor aislante</b>
D < 35 mm	30 mm
D > 35 mm	40 mm

**Fuente.** (Juan Carlos Martínez, 2013)

El espesor mínimo de aislamiento de las tuberías de diámetro exterior menor o igual a 20 mm y de longitud menor que 5 m, contada a partir de la conexión de la red de tuberías hasta la unidad terminal será de 10 mm, por lo cual se tomara este valor inicialmente para el espesor del aislamiento.

### Convección en el interior de la tubería

$$V = 0.23 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho * v * Di}{u}$$

$$Re = \frac{990.22 \frac{kg}{m^3} * 0.23 \text{ m/s} * 0.0145m}{6.04 * 10^{-4} Pa.s} = 5467.52$$

$$Re > 2300$$

Se tiene convección forzada en régimen turbulento por lo cual se utiliza la siguiente expresión de Dittus- Boelter:

$$Nu = 0.023 * Re^{4/5} * Pr^{0.3} \quad (64)$$

$$Nu = 0.023 * (5467.52)^{4/5} * (3.86)^{0.3} = 33.72$$

$$h = Nu * \frac{K}{di}$$

$$h1 = 33.72 * \frac{0.6536}{0.0145}$$

$$h = 1519.95 \frac{W}{m^2 * ^\circ K}$$

### Convección en el exterior de la tubería

$$Re = \frac{\rho * v * De}{\mu}$$

$$Re = \frac{1.24 \frac{kg}{m^3} * 0.8 m/s * 0.021m}{1.778 * 10^{-5} Pa.s} = 1171.65$$

$$Nu = C * Re^m * Pr^{0.333} \quad (65)$$

$$Nu = 0.683 * 2231.72^{(0.466)} * (0.7336)^{0.333}$$

$$Nu = 16.58$$

$$h2 = 16.58 * \frac{0.024}{0.021} = 18.94 \frac{W}{m * ^\circ K}$$

**Conductividad térmica:****Polipropileno:**

$$K1 = 0.22 \frac{W}{m^{\circ}K}$$

**Radios:**

$$r1 = 0.00725 \text{ m (Radio Interno tubería)}$$

$$r2 = 0.01065 \text{ m (Radio Externo tubería)}$$

$$r3 = 0.02065 \text{ m (Radio Lana Mineral)}$$

**Áreas:**

$$L = 4 \text{ m (Longitud total tubería } \frac{1}{2} \text{ pulg)}$$

$$A1 = 2 * \pi * r1 * L = 2 * \pi * 0.00725 * 4 = 0.182 \text{ m}^2$$

$$A2 = 2 * \pi * r3 * L = 2 * \pi * 0.02065 * 4 = 0.518 \text{ m}^2$$

$$R1_{conv} = \frac{1}{h1 * A1} = 3.61 * 10^{-3} \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$R1_{cond_{poli}} = \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2 * \pi * k1 * L} = 0.069 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$R2_{cond_{lana}} = \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2 * \pi * k2 * L} = 0.675 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$R2_{conv} = \frac{1}{h2 * A2} = 0.10 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$RT = R1_{conv} + R1_{cond_{poli}} + R2_{cond_{lana}} + R2_{conv}$$

$$RT = 0.84 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{RT}$$

$$Q = \frac{45 - 11}{0.84} = 40.47 W$$

El calor perdido es de 40.47 W que es menor al calor máximo a ser transferido por lo cual el espesor del aislante para la tubería es el adecuado.

### **Pérdidas de calor por radiación las tuberías de interconexión**

El cálculo de las pérdidas se realiza mediante la siguiente expresión:

$$Q_{rad} = \varepsilon * \sigma * At * (Ts^4 - Ta^4)$$

$$Q_{rad} = 0.94 * (5.8 * 10^{-8}) * (0.259) * (287^4 - 284^4) = 3.94W$$

Para saber el calor perdido por el acumulador se suma las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

$$Q_{total} = 40.47 W + 3.94 W = 44.41 W$$

El calor perdido es de 44.41 W que es menor al calor máximo a ser transferido por lo cual el espesor del aislante es el adecuado.

#### **3.1.4.4 Eficiencia teórica del colector**

Para poder calcular la eficiencia del colector es necesario saber el calor útil que los colectores solares transmiten al fluido, es decir el calor que captan los colectores menos las pérdidas que se da en el acumulador y las tuberías de conexión.

$$Q_{perdido} = Q_{acumulador} + Q_{tuberías} \quad (66)$$

$$Q_{perdido} = 47 + 44.41 = 91.41$$

$$Q_{útil} = E_{neta} - Q_{perdido} = 1063.27 - 91.41 = 971.86$$

$$\mathbf{n} = \frac{Qutil}{Eneta}$$

(67)

$$\mathbf{n} = \frac{Qutil}{Eneta} = 91\%$$

## CAPITULO IV

### INSTRUMENTACIÓN

#### 4.1 Diseño sistema monitoreo

Se va a desarrollar un sistema de monitoreo de variables imprescindibles para conocer el funcionamiento de una instalación solar tales como:

- Temperatura de entrada del agua proveniente del colector solar al acumulador
- Temperatura de salida del acumulador
- Temperatura superficial del acumulador de ACS
- Temperatura en el interior del acumulador
- Deformaciones longitudinales y transversales debido a los cambios de temperatura y presión en el acumulador.

Por medio del monitoreo se va a conocer el comportamiento que tiene un acumulador de ACS debido a los cambios de temperatura presentes en el ambiente, como lo es el monitorear los distintos esfuerzos a los cuales está sometido este tipo de acumuladores debido a las deformaciones por la presión a la cual está operando, observar continuamente que los valores de los esfuerzos tanto de cuerpo como cabeza se encuentren dentro de la zona elástica, y así se asegure el buen funcionamiento del acumulador y un alargamiento de su vida útil.

El sistema que se va a desarrollar se compondrá por los siguientes elementos principalmente:

- Módulo Fotovoltaico
- Baterías
- Sistema de Adquisición de datos
- Sensores de temperatura y deformaciones que se seleccionará a continuación dependiendo de las características del sistema.

El sistema fotovoltaico que se implementará es un sistema autónomo ya que se va a alimentar cargas mediante el uso de baterías y módulos fotovoltaicos.

## 4.2 Selección sensores

### 4.2.1 Sensores de temperatura

Como primera característica para la selección de sensores de temperatura se tiene que tener en cuenta el medio en el cual se va a realizar la medición, es decir un sensor sumergible en el agua ya que son las temperaturas que vamos a medir, para lo cual lo más idóneo es elegir termocuplas sumergibles, que son las comúnmente utilizadas en la industria.

**Tabla 9.**

Representa los parámetros de selección para termocuplas sumergibles.

Parámetros	PT-100	Termocupla J	Termocupla K
<b>Costo</b>	\$ 93	\$ 35	\$129
<b>Montaje</b>	Medio	Fácil	Medio
<b>Precisión</b>	Media	Alta	Alta
<b>Acondicionamiento</b>	Si Necesita	Si Necesita	Si Necesita
<b>Disponibilidad</b>	No	Si	No
<b>Mercado</b>			
<b>Mantenimiento</b>	Si	No	Si
<b>Rango de temperatura °C</b>	-59 a 371	0 a 450	0 a 1280
<b>Límites de error</b>	Media	Alta	Media

**Tabla 10.**

Matriz de decisión para termocuplas

PARÁMETROS	%	ALTERNATIVAS		
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
<b>ASPECTOS TÉCNICOS</b>	<b>50</b>			
Rango de temperatura de trabajo	20	16	18	18
Precisión	10	6	8	8
Tiempo de respuesta térmica	10	8	8	6
Facilidad de mantenimiento.	5	4	5	3
Acondicionamiento	5	3	3	3
<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>	<b>40</b>			
Costo en el mercado	40	35	35	38
<b>ASPECTOS VARIOS</b>	<b>10</b>			
Disponibilidad en el mercado	5	3	4	3
Extensión de alambre de conexión	5	5	5	5
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>86</b>	<b>84</b>

La matriz de decisión de la tabla 10, muestra como primera alternativa PT100, segunda termocupla tipo J, y la tercera termocupla tipo K, se concluye que la alternativa más óptima es la 2<sup>a</sup>, con un puntaje de 86 %, se optó por las termocuplas sumergibles tipo J que son las más comunes en el mercado de marca IEE las cuales poseen las siguientes características:

### **Termocupla Tipo J IEE ELECTRIC**

Temperatura Máxima: 450 °C

Bulbo: 10 cm \* 3/16

Conexión: 5/16

Cable Extensión: 2m

Alambre termopar sólido

Construcción de Acero Inoxidable

Los neplios de conexión del acumulador tienen una longitud de 8 cm, entonces es apropiada la dimensión del bulbo de la termocupla para la medición de la temperatura en los puntos requeridos. Para mayor detalle vea **ANEXO 2**



**Figura 32.** Termocupla Tipo J

Debido a que se va a medir también la temperatura superficial del acumulador se necesita de otro tipo de sensor que es el LM35.

El LM35 es un sensor cuya salida es lineal, no requiere de una calibración externa ya que posee una precisión de  $\pm 1/4$  °C en el rango de temperatura de -55 a 150 °C, el cual posee las siguientes ventajas.

- Económico
- Calibrado directamente en la escala de Celsius
- Buena precisión
- Rango de trabajo de -55 a 150 °C
- Opera con voltajes de alimentación de 4 a 30 Voltios
- Baja corriente de alimentación (60  $\mu$ A)
- Amplia gama de aplicaciones
- Fácil Aplicación

Para mayor detalle vea **ANEXO 3**

#### 4.4.2 Sensores de deformaciones

Para la selección de los sensores de deformación se hacerla siguiente matriz de selección.

**Tabla 11.**

Parámetros de decisión sensores de deformación

Parámetros	Galgas Extensiométricas Biaxial	Roseta de deformaciones	Sensores ópticos de Deformaciones
<b>Costo</b>	\$ 60	\$ 100	\$145
<b>Montaje Galgas</b>	Medio	Medio	Fácil
<b>Medida de Esfuerzos</b>	Biaxiales	Biaxiales	Todo tipo
<b>Acondicionamiento</b>	Si Necesita	Si Necesita	No Necesita
<b>Disponibilidad Mercado</b>	Si	Si	No
<b>Obtención de Esfuerzos Principales</b>	Mide las deformaciones en los ejes x e y directamente.	Se necesita la transformación de deformaciones.	Mide las deformaciones x e y directamente
<b>Precisión</b>	Media	Media	Buena

**Tabla 12**

Matriz de decisión para sensores de deformación

PARÁMETROS	%	ALTERNATIVAS		
		1ª	2ª	3ª
<b>ASPECTOS TÉCNICOS</b>	<b>40</b>			
Medida de Esfuerzos	15	15	15	15
Necesidad Acondicionamiento	10	5	5	8
Precisión	10	7	7	9
Obtención Esfuerzos Principales	5	5	3	5

<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>	<b>40</b>			
Bajo costo en el mercado.	40	35	30	20
<b>ASPECTOS VARIOS</b>	<b>20</b>			
Disponibilidad en el Mercado	10	8	8	0
Facilidad de Montaje	10	7	7	10
<b>TOTAL</b>		<b>82</b>	<b>75</b>	<b>67</b>

La matriz de decisión de la tabla 12, muestra como primera alternativa la galga extensiométrica biaxial, segunda la roseta de deformaciones, y la tercera el sensor óptico, se concluye que la alternativa más óptima es la 1ª, con un puntaje de 82 %, que a pesar de no tener una buena precisión es la más acertada por su bajo costo económico, y la disponibilidad ya que en el país es difícil encontrar este tipo de sensores.



**Figura 33.**Esquema Galga Biaxial

(Miguel, 2015)

Estos sensores nos permitirán calcular los esfuerzos en el cilindro en base en las deformaciones captadas en dos direcciones.

### **Galgas biaxiales**

Los sensores utilizados para la medición, son galgas biaxiales – 0°/90°, referencia SGD-7/350- XY11. De OMEGA ENGINEERING.

	SGD-7/350-XY11	350	6.50 3.10 11.40 11.40 (0.256) (0.122) (0.449) (0.449) Large Tee stacked rosette pattern 350 Ω	15	Ribbon Leads	ST	BTP-4
	SGD-7/350-XY13	350		20	Ribbon Leads	AL	
	SGD-7/350-XY41	350		15	Solder Pads	ST	
	SGD-7/350-XY43	350		20	Solder Pads	AL	

**Figura 34.** Características Galga Biaxial

(Omega, 2003)

Para mayor detalle vea **ANEXO 4**

## 4.5 Acondicionamiento de señal

### 4.5.1 Acondicionamiento galgas extensiométrica

Para poder medir las deformaciones con las galgas extensiométricas es necesario realizar un acondicionamiento de señal, formado por dos circuitos:

- Circuito Puente de Wheatstone
- Amplificador de instrumentación AD620

#### 4.5.1.1 Puente de Wheatstone

Se utiliza para obtener una señal eléctrica proporcional a la fuerza que se aplica sobre la galga, que en este caso es la variación de presión en el interior del cilindro, este método consiste en medir la diferencia de tensión ente las dos ramas ( $V_d$ ).

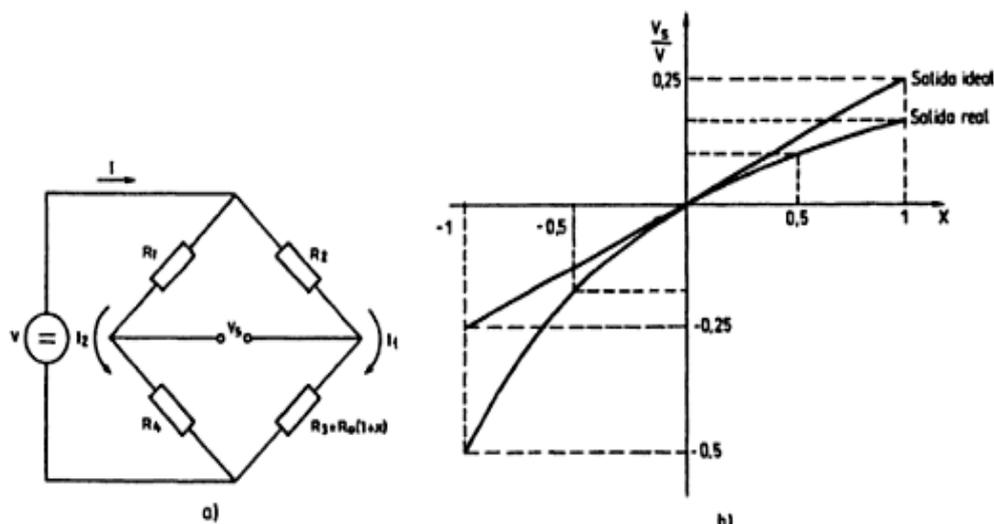


Figura 35. Puento de Wheatstone

(Areny, 2003)

#### 4.5.1.2 Amplificador de instrumentación AD620

El amplificador AD620 se utilizó para amplificar la diferencia de voltaje en los terminales de salida de las galgas, debido a que la señal proveniente del puente de Wheatstone es muy pequeña, su medida está en los mV, se utilizó un amplificador para cada dirección de la galga tanto para las longitudinales como para las transversales, este amplificador está compuesto por tres amplificadores operacionales y siete resistencias lo cual lo hace muy útil y tiene las siguientes características.

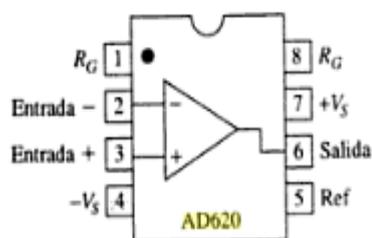


Figura 36. Amplificador AD620

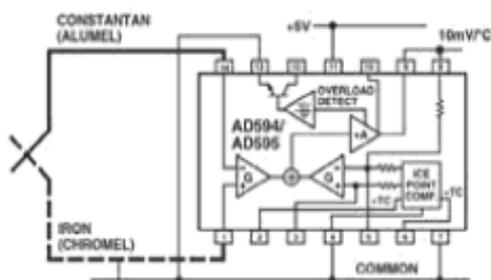
Fuente: (Coughlin, 1993)

- Alta impedancia de entrada
- Impedancia de salida baja
- Capaz de trabajar con sensores que ofrecen señales eléctricas muy bajas
- Bajo consumo aproximadamente de 1.3 A ,perfecto para aplicaciones portátiles
- Bajo ruido
- Bajo costo
- El desempeño en DC es excelente ya que solo tiene un máximo de 50 uV de offset

Para mayor detalle ver **ANEXO 5**

#### 4.5.2 Acondicionamiento Termocupla

Se utiliza un amplificador de termocupla AD594, es un amplificador de instrumentación para termocuplas tipo J, cuando se conecta la termocupla este realiza una compensación de temperatura con una sensibilidad de 10mV/ °C y para compensar de modo preciso la tensión de la unión de referencia sobre el rango de operación del circuito si el circuito integrado y la unión de referencia se encuentran ambos a la misma temperatura. El rango de temperatura ambiente para el AD594 va de 0°C a 50 °C, fuera de este rango el error de medición aumenta.



**Figura 37.** Esquema conexión AD594

**Fuente.** (Miguel, 2015)

Posee las siguientes características:

- Bajo consumo de potencia
- Amplio rango de alimentación ( + 5V a +15 V)

Para mayor detalle ver **ANEXO 6**

#### 4.6 Adquisición de datos

Para el sistema de adquisición de datos existen diversos controladores como lo son:

- PLC (Controlador Lógico Programable)
- Arduino

Para la elección se enumera los parámetros importantes de estos controladores.

Tabla 13

#### Parámetros de decisión de controladores

Parámetros	PLC	Arduino
<b>Costo</b>	\$ 340	\$ 70
<b>Entradas</b>	6	14
<b>Salidas</b>	4	14
<b>Alimentación</b>	85-264 v	6-12 v
<b>Aplicaciones</b>	Maquinaria de grandes industrias , control de procesos industriales	Maquinas pequeñas , procesos autónomos
<b>Lenguaje Programación</b>	Amplios Lenguajes de Programación	Lenguaje LADDER (Escalera)

**Tabla 14**

Matriz de decisión para el sistema de adquisición de datos

<b>ADQUISICIÓN DE DATOS</b>			
<b>PARÁMETROS</b>	%	ALTERNATIVAS	
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
<b>ASPECTOS TÉCNICOS</b>	50		
Número de Entradas	20	15	10
Número de Salidas	10	15	10
Alimentación	5	4	3
Lenguaje Programación	5	4	2
<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>	40		
Costo en el mercado.	40	38	15
<b>ASPECTOS VARIOS</b>	10		
Aplicaciones en la Industria	10	10	5
<b>TOTAL</b>		<b>86</b>	<b>45</b>

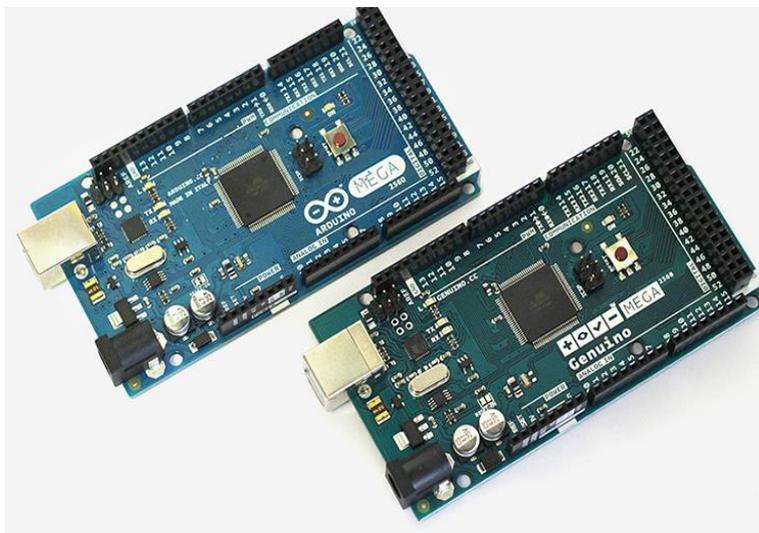
La matriz de decisión de la tabla 13, muestra como primera alternativa el Arduino y como segunda al PLC, se concluye que la alternativa más óptima es la 1<sup>a</sup>, con un puntaje de 86 %, ya que cumple con las necesidades técnicas y económicas del proyecto.

Este sistema de monitoreo consta de las siguientes entradas analógicas:

- **Temperatura** : 3 termocuplas sumergibles , 1 LM35 de contacto
- **Deformación**: 1 Galga extensiométrica cuerpo, y otra en la cabeza.

Lo cual da un total de 8 entradas analógicas, para cual se escoge un Arduino dependiendo del número de entradas que se tiene.

## Arduino mega 2560



**Figura 38.**Arduino Mega

**Fuente.** (Areny, 2003)

### **Características Generales**

**Microcontrolador:** ATmega2560

**Voltage de operación:** 5V

**Voltaje recomendado de entrada:** 7-12 V

**Voltaje de entrada límite:** 6-20 V

**Pins de entradas digitales I/O:** 54

**Pins de entradas Análogas I/O:** 16

**Corriente DC por pin:** 20 mA

**Corriente DC por 3.3 V por pin:** 50 mA

**Memory Flash:** 256 KB

Para mayor detalle ver **ANEXO 7**

#### 4.7 Sistema de visualización

Para realizar el monitoreo, se lo hará mediante una pantalla LCD de 7.5 cm de largo por 5cm de ancho, en la cual se mostrará los datos de las cuatro termocuplas y los esfuerzos longitudinales - transversales del cuerpo y cabeza del acumulador, para lo cual se hará la programación con el software del Arduino de manera que se muestren los datos mencionados en el LCD de una manera continua durante el tiempo que el sistema electrónico se encuentre encendido mediante un Switch On-Off. La pantalla tiene 20 pines de conexión al Arduino.

#### Esquema del circuito de instrumentación (Conexiones Arduino):

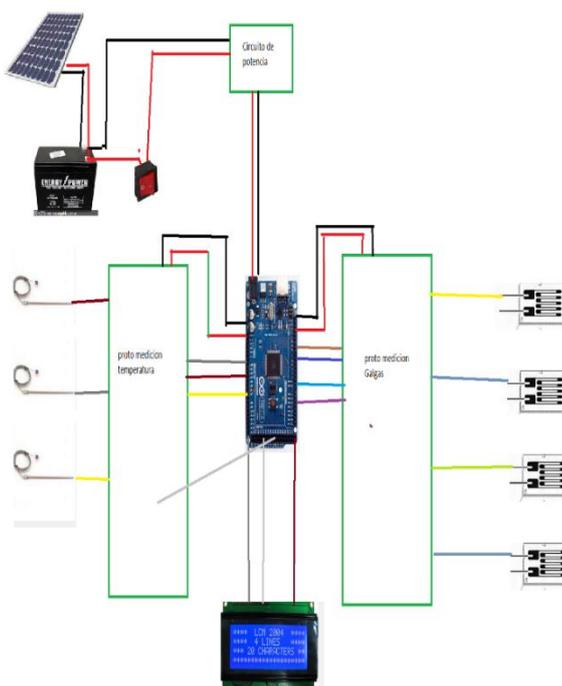


Figura 39. Esquema conexión sensores

## 4.8 Dimensionamiento sistema fotovoltaico

### 4.8.1 Dimensionamiento panel

El tamaño del panel debe asegurar que la energía producida durante el peor mes, pueda satisfacer la demanda que requiera la carga, para lo cual es necesario conocer la potencia de cada elemento utilizado y las horas diarias de funcionamiento.

De acuerdo al mapa de energía solar promedio multianual del Servicio de Meteorología del Gobierno del Ecuador en la ciudad de Sangolquí, se tiene una irradiación solar global en un rango entre  $5 \text{ Kwh}/\text{m}^2$  y  $5.5 \text{ Kwh}/\text{m}^2$  promedio al año, para lo cual escogemos el valor más bajo de irradiación y así tener la condición de trabajo más desfavorable con la finalidad de dimensionar los recursos necesarios.

Para dimensionar el sistema fotovoltaico es necesario saber cuánta energía eléctrica se requiere en el objetivo a electrificar así como también tener en cuenta las características de los equipos que van a ser alimentados y el tiempo de empleo de cada elemento para lo cual se realiza una lista de cargas que serán alimentadas por el sistema fotovoltaico como se observa en la Tabla 14.

**Tabla 15.**

Energía requerida sistema solar

<b>Cant</b>	<b>Equipo</b>	<b>Potencia (Watts)</b>	<b>N° Horas funcionamiento al día</b>	<b>Energía Requerida Wh/día</b>
4	Galgas	0.80	6	4.8
3	Termocupla Sumergible ML35	0.7	6	4.2
1	Termocupla de contacto	0.6	6	3.6
1	Arduino Mega	1.2	6	7.2
1	LCD	1.44	6	8.64
<b>Energía Requerida (Er)</b>				<b>28.44</b>

Para dimensionar el tamaño del sistema fotovoltaico se utiliza la siguiente expresión:

$$Ar = \frac{1200 * Er}{Irradiación} \quad (72)$$

$$Ar = \frac{1200 * (0.028)}{5} = 6.816 \text{ Wp}$$

De acuerdo a la potencia que necesitamos para nuestro sistema necesitaremos un panel solar de 10 Watts, un panel sobredimensionado debido a que los valores de consumo de potencia de los sensores son aproximados, lo que difiere cuando ya se encuentren conectados al sistema de monitoreo en donde la potencia será mayor debido a los circuitos acondicionadores que se van a implementar. Para mayor detalle ver **ANEXO 8**

#### 4.8.2 Cálculo del número y la capacidad de las baterías

Como primer parámetro para el dimensionamiento de las baterías se sabe gracias a las mediciones que se hizo con el multímetro que todo el sistema de sensores, acondicionamiento, Arduino y pantalla de visualización consume alrededor de 850 mA- 1A.

Como la intensidad de corriente que consume es baja, y debido a que el arduino puede soportar un voltaje que va entre los valores de 5 V a 12 V, se selecciona las baterías secas de 12 voltios, 7 AH que son energizadores de paneles solares presentes en el mercado local. Para mayor detalle ver

Para dimensionar el tamaño y capacidad de las baterías se utiliza la siguiente expresión, como autonomía se tiene 7 horas ya que el sistema consume máximo 1 A.

$$Tamaño = \left( \frac{Autonomía * Er}{Eficiencia * Descarga} \right) \quad (73)$$

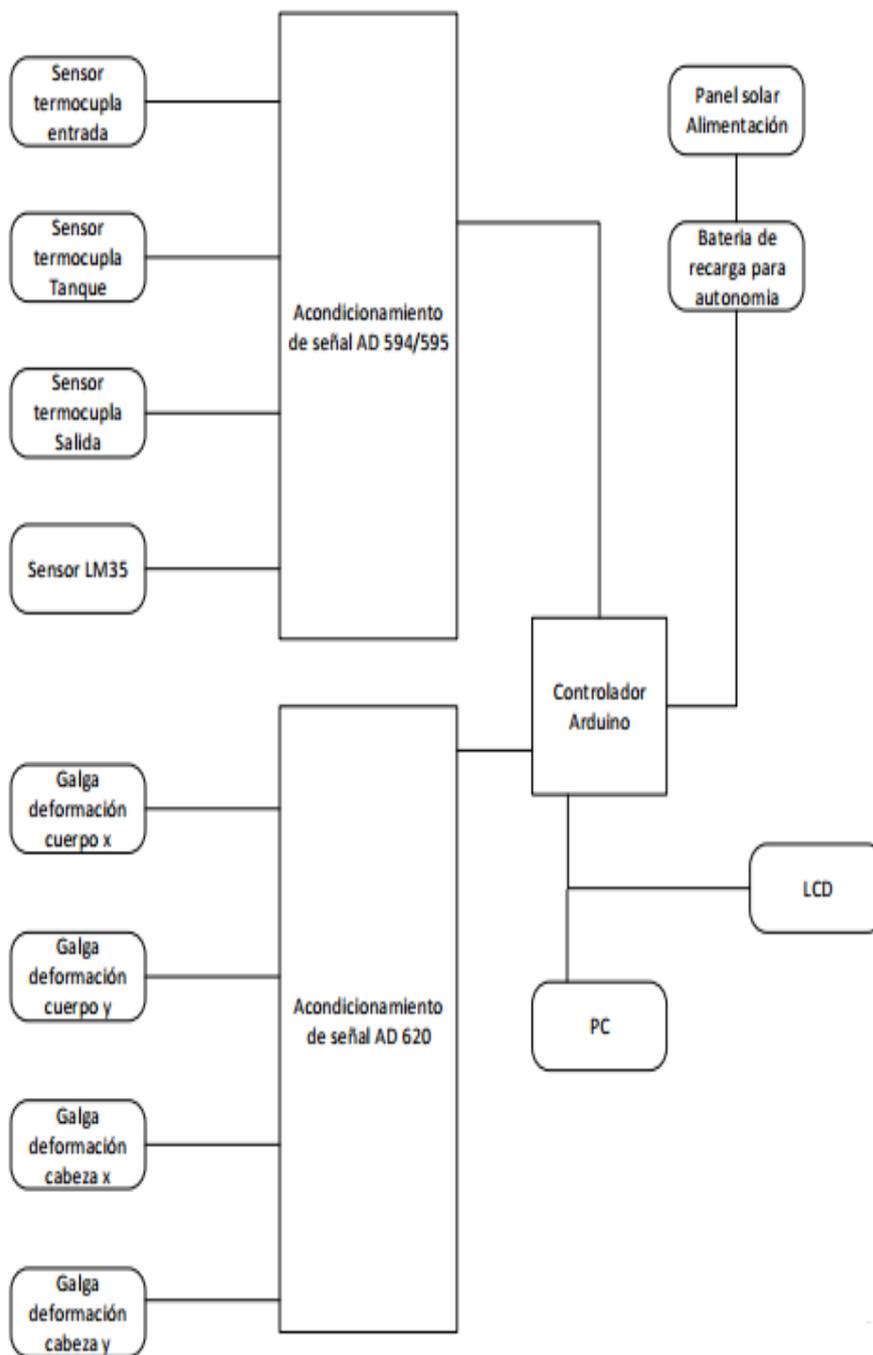
Para fines de dimensionamiento se considera, una eficiencia del 80% y una descarga del 50%.

$$Tamaño = \left( \frac{0.29 \text{ día} * 28.44 \text{ Wh/días}}{0.80 * 0.50} \right) = 20.61 \text{ Wh}$$

$$Númerobaterías = Tamaño / (Ah * V) \quad (74)$$

$$Númerobaterías = \frac{20.61(Wh)}{7Ah * 12} = 0.45 \approx 1 \text{ batería}$$

#### 4.9 Diagrama conexión sistema



**Figura 40.**Diagrama conexión sistema monitoreo

## CAPÍTULO V

### CONSTRUCCIÓN

#### 5.1 Proceso de construcción

Determinado los parámetros pre-constructivos se procede a fabricar cada uno de los componentes del acumulador, rigiéndose a los planos correspondientes. Para la construcción se recomienda seguir el siguiente flujograma indicado en la figura 41.

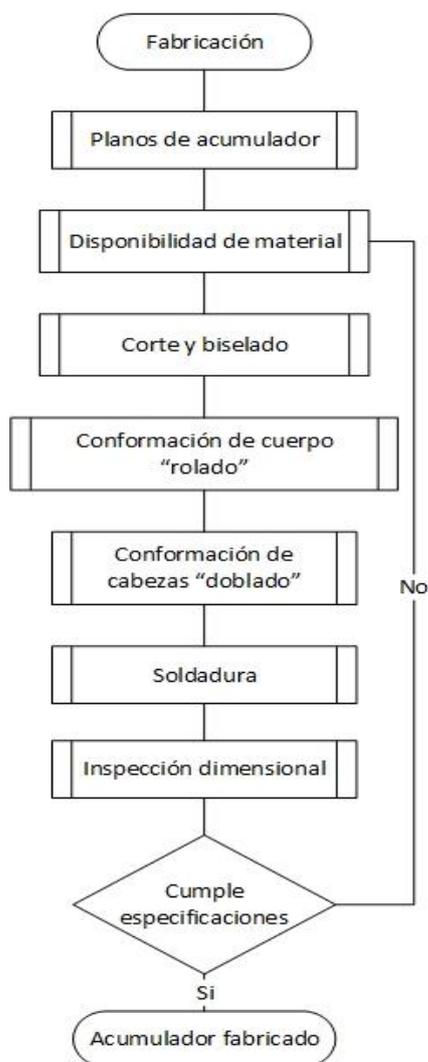
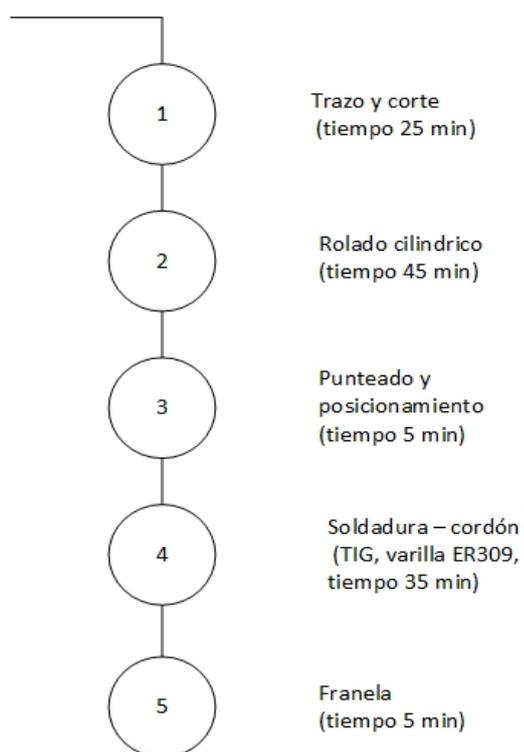
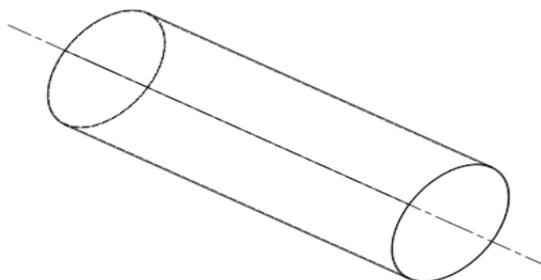


Figura 41. Diagrama de fabricación de acumulador

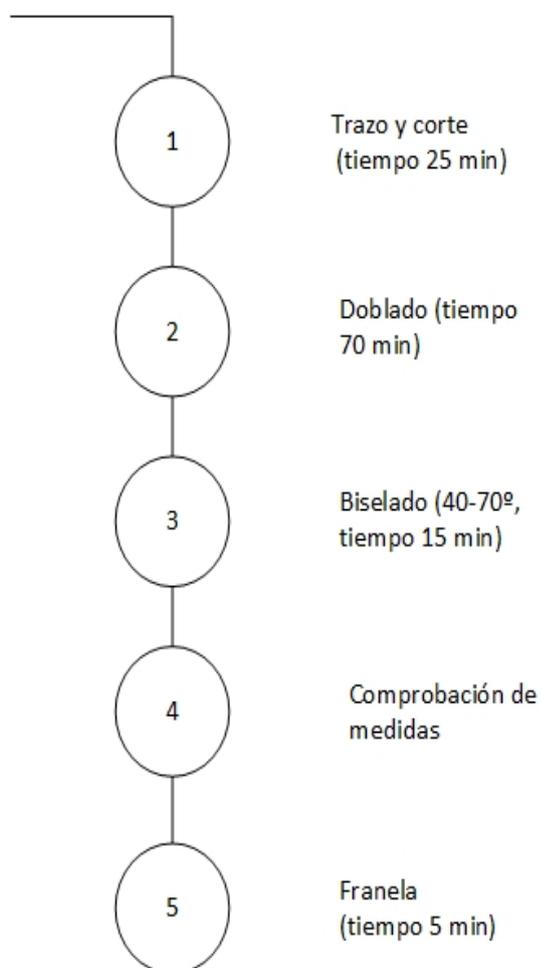
Para la construcción del acumulador y sus partes se desarrollan los siguientes diagramas de procesos de construcción.

### 5.1.1 Diagrama construcción Cuerpo Acumulador



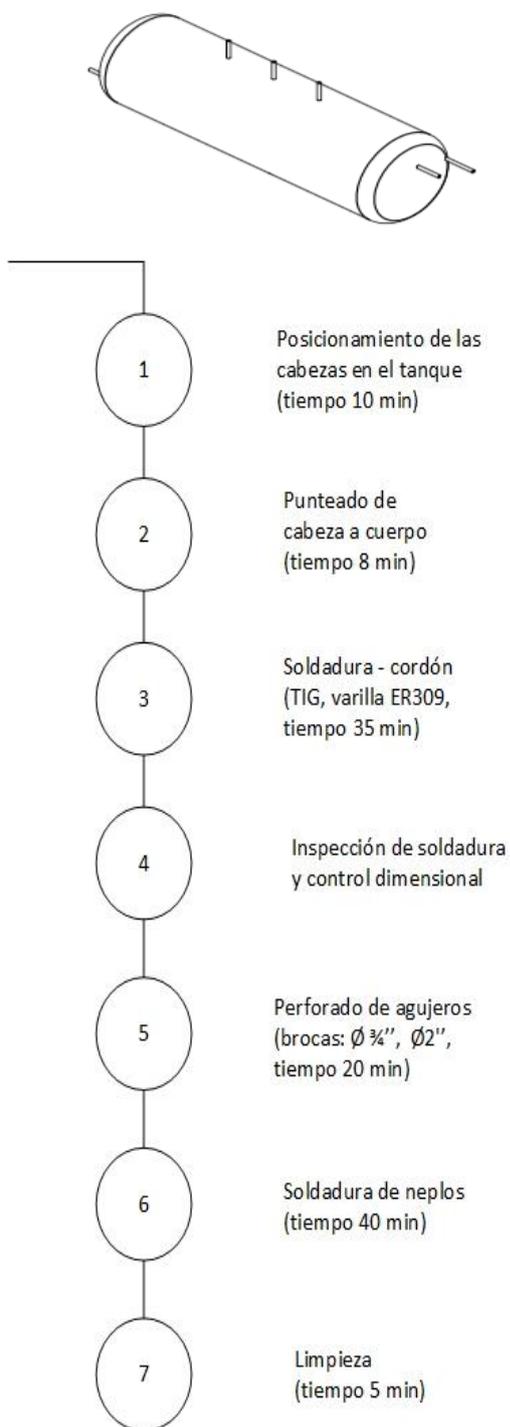
**Figura 42.**Diagrama Proceso Cuerpo Cilíndrico

### 5.1.2 Diagrama construcción Cabeza Acumulador



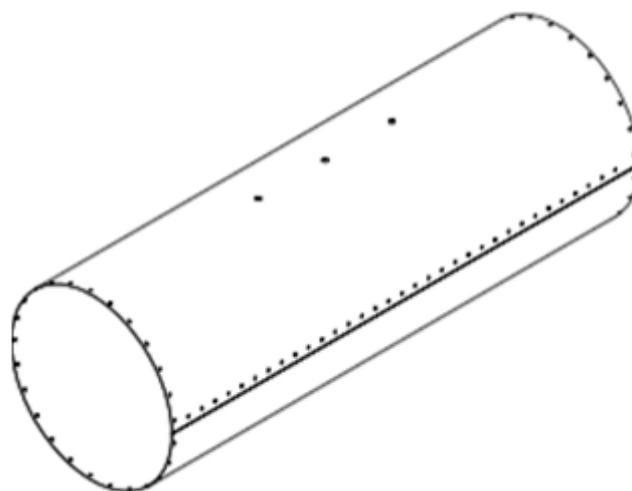
**Figura 43.**Diagrama Proceso cabezas

### 5.1.3 Diagrama Ensamble Acumulador



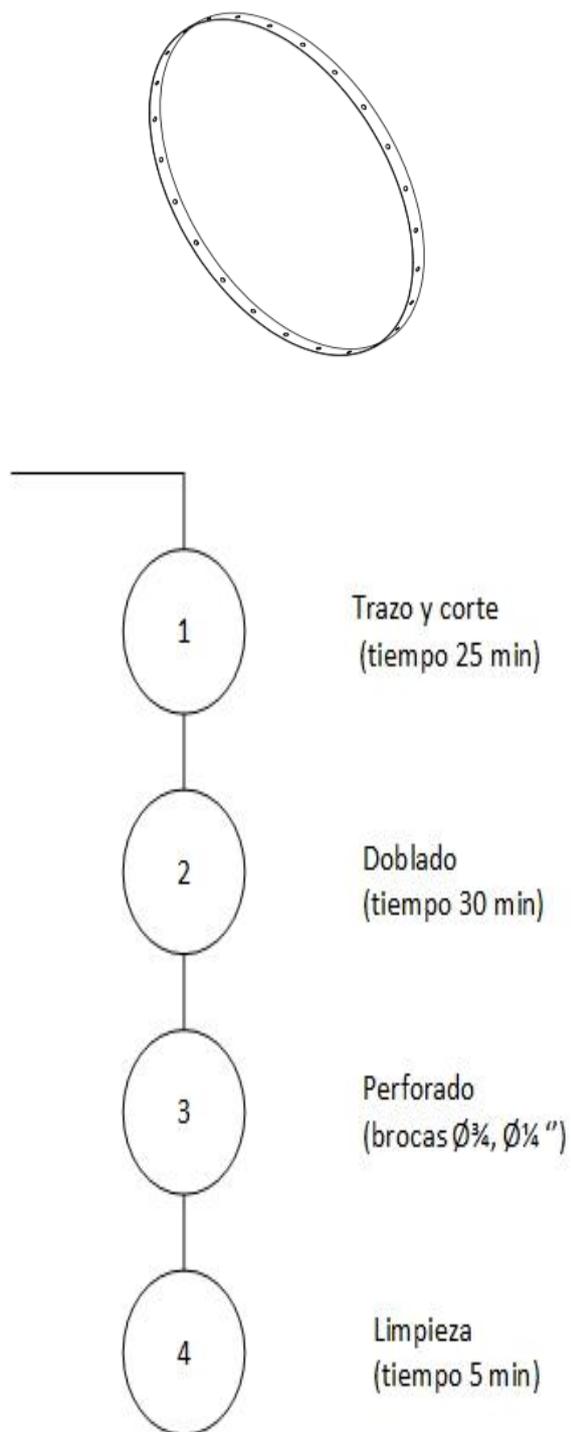
**Figura 44.**Ensamble Acumulador

### 5.1.4 Diagrama Fabricación Carcaza de Protección Cuerpo



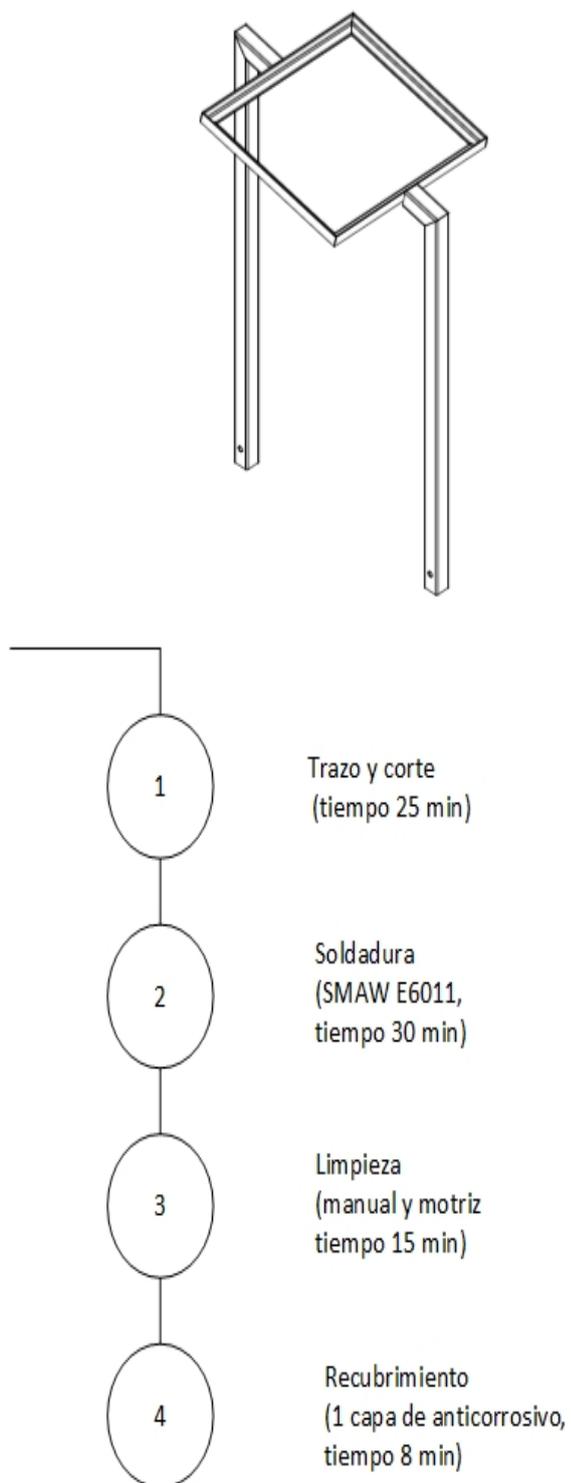
**Figura 45.** Fabricación carcasa acumulador

### 5.1.5 Diagrama Fabricación carcaza de Protección Cabezas



**Figura 46.** Diagrama Proceso Carcaza Cabezas

### 5.1.6 Diagrama Fabricación Estructura para Panel Fotovoltaico



**Figura 47.** Fabricación Soporte Panel

## 5.2 Fabricación de partes

Está diseñada con el propósito de almacenar agua para el uso humano, el material seleccionado de acuerdo a cálculos y disponibilidad en el mercado.

Se seleccionó acero inoxidable AISI 304 ideal para el uso de almacenamiento de agua por su alta resistencia a la corrosión.

### 5.2.1 Acumulador

El cuerpo y las cabezas se realizaron con una plancha AISI 304 de dimensiones 1,22 x 1.22 m y de espesor 3mm las propiedades del material se indica en tabla 15.

**Tabla 16.**

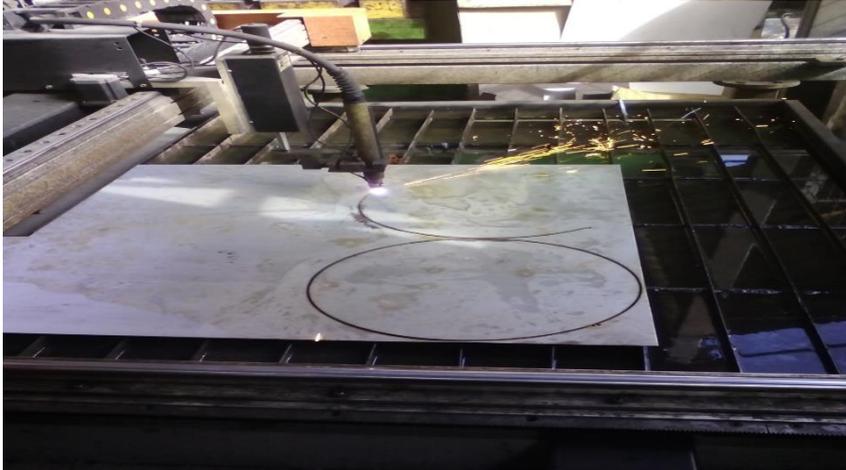
Propiedades mecánicas del acero AISI 304

Espesor	Resistencia a las tensión	Resistencia máxima	Elongación
1/8"	310 MPa (45 KSI)	620 MPa (90 KSI)	30 % (en 50mm)

#### 5.2.1.1 Corte y biselado de planchas metálicas

De la plancha de acero AISI 304 se realiza el corte con plasma como se muestra en la figura 48, utilizado con mucha frecuencia para acero y material no ferroso de menos de 1 pulgada de espesor, para la conformación del cuerpo que es rolado y cabezas que son dobladas para obtener su forma semi-elíptica.

Con la amoladora nos permite biselar al material con un ángulo entre 40-70 grados que nos permite soldar el material acorde al WPS realizado.



**Figura 48.** Corte plasma cabeza acumulador

#### **5.2.1.2 Rolado de planchas metálicas**

El rolado da la forma circular o cilíndrica a la plancha través de rodillos o soportes (figura 49), las características que definen el producto que sale del rolado, son el diámetro del tubo y su espesor de pared según lo requerido.



**Figura 49.** Rolado cuerpo acumulador

Las cabezas se realizarán por doblado a través de rodillos, como se muestra en la figura 50, que irán doblando los bordes haciendo que tome su forma progresivamente conforme se vaya aumentando la presión de los mismos hasta obtener la forma deseada.



**Figura 50.** Doblado Cabezas

### **5.3 SOLDADURA**

Debido al material AISI 304 se realizó la soldadura con proceso TIG (GTAW), ya que el espesor de nuestro acumulador es de 3mm y este tipo de soldadura sirve para espesores de hasta 6.4 mm. Según especificaciones de la AWS A5.9 se utiliza el siguiente electrodo.

**Material Base:** AISI 304 (S30400)

**Electrodo:** ER309L

Para soldar el cuerpo del acumulador se utilizó una junta a tope cuyas especificaciones se encuentran en los WPS de los procesos de soldadura respectivos. **ANEXO 9**

Por lo contrario para soldar las cabezas al cuerpo se utilizó una junta en bisel cuyas especificaciones se encuentran en el **ANEXO 10**.

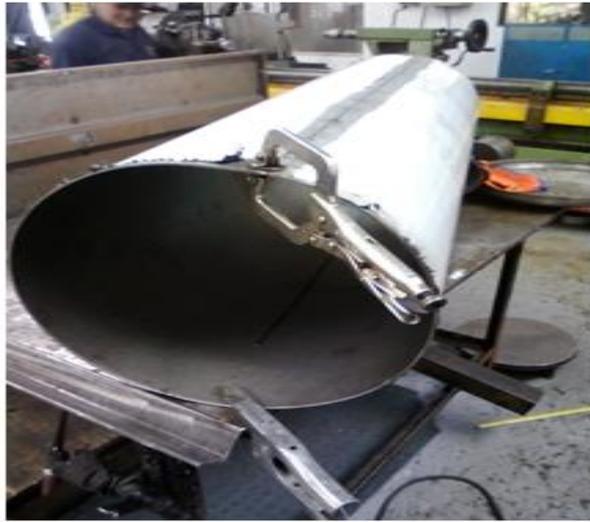
Después del rolado se coloca de manera vertical el acumulador y se unen los extremos mediante soldadura TIG.

Se va realizando la soldadura siguiendo las líneas punteadas previamente (figura 49), logrando una soldadura homogénea, de buena apariencia y con un acabado completamente liso (figura 51).



**Figura 51.** Soldadura cuerpo acumulador

La cabeza se coloca sobre la pieza cilíndrica, se igualan los bordes de ambas partes y se va punteando con la soldadura fijándolo en su posición final, culminada la soldadura de fijación se inicia el procedimiento de soldadura continua (figura 52).



**Figura 52.** Soldadura cuerpo acumulador



**Figura 53.** Acumulador Finalizado

## 5.4 Accesorios

Se realizarán perforaciones en el cuerpo y cabezas, posteriormente se sueldan neplros roscados de  $\frac{1}{2}$  pulgada de ingreso-salida de agua, desfogue de presión y para limpieza neplo 1  $\frac{1}{2}$  pulgada en la parte inferior del recipiente, se suelda con TIG y material de aporte AISI 304 reforzando los accesorios, como indica la figura 54.



**Figura 54.** Soldadura Accesorios Acumulador

## 5.5 Recubrimiento superficial del recipiente

El recipiente va recubierto de lana mineral de 50mm cuyo dimensionamiento se encuentra detallado en el capítulo III, garantiza la menor pérdida de calor, uniformidad de la conductividad térmica en el recipiente, por su densidad, flexibilidad y facilidad de manejo es un material de rápida instalación que se adapta a las superficies irregulares de los equipos maximizando su operación.

Con el objetivo de no perder las propiedades del aislante debido a las condiciones ambientales a las que este expuesto, se construye una cubierta

de acero galvanizado de espesor 1 mm (figura 55) que tome la forma del acumulador que protege al aislamiento térmico de lluvia, viento, polvo, etc.



**Figura 55.** Cubierta acero galvanizado

## 5.6 Montaje

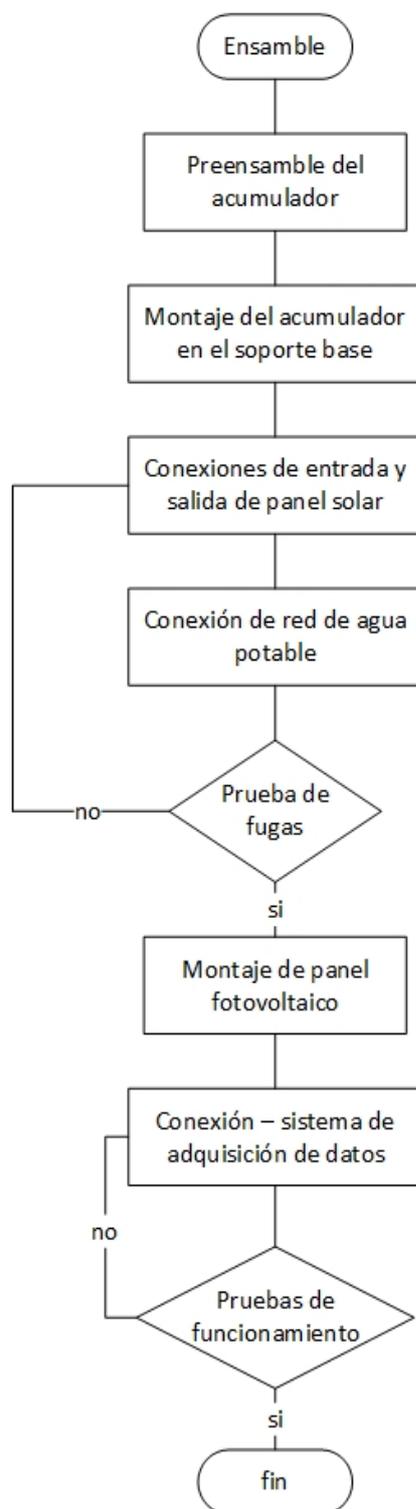


Figura 56. Montaje Acumulador

### 5.6.1 Montaje Acumulador

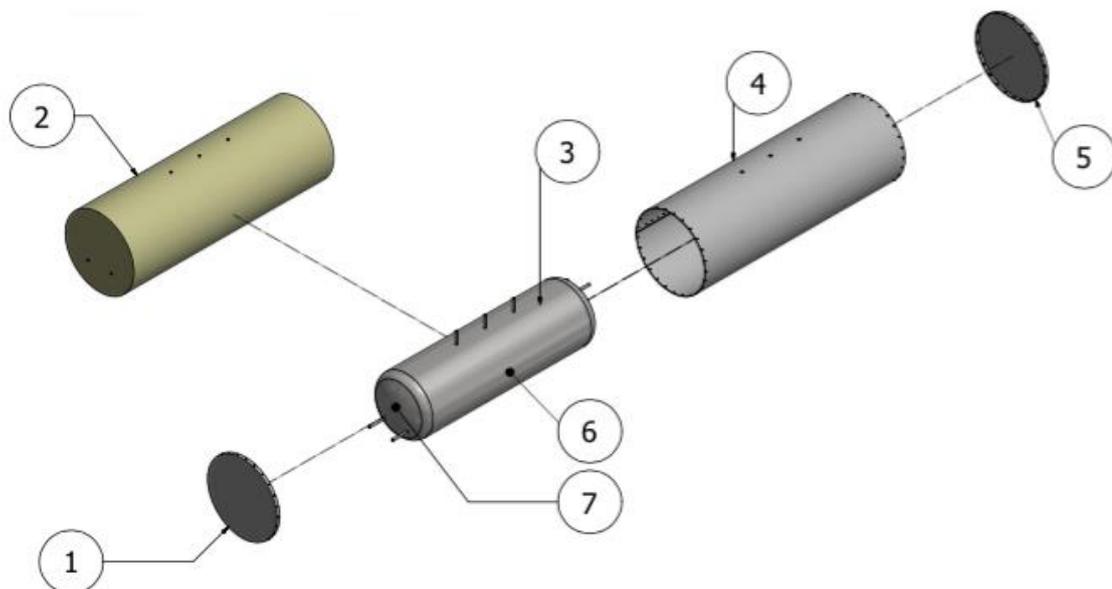
Una vez construido el acumulador y cada uno de sus componentes ya señalados en los diagramas de procesos e instalado las galgas biaxiales en cuerpo y cabeza, procedemos al premontaje del acumulador, que se detalla sus materiales en tabla 16.

**Tabla 17.**

Materiales montaje acumulador

<b>Nro</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	Cubierta Protección Cabeza Izquierda
<b>2</b>	Fibra de Vidrio (Aislamiento Térmico)
<b>3</b>	Acumulador
<b>4</b>	Cubierta Protección Cuerpo
<b>5</b>	Cubierta Protección Cabeza Derecha
<b>6</b>	Galga Biaxiales Cuerpo
<b>7</b>	Galga Biaxiales Cabeza

- Se instala las galgas Extensiométricas en la superficie del acumulador en cuerpo y cabeza.
- Se coloca el aislamiento térmico tomando la forma del acumulador dejando espacio para cableado de las galgas biaxiales
- Se monta la cubierta de protección de la fibra de vidrio tomando la forma de cuerpo asegurándolas con remaches.
- Se monta la cubierta de protección de la lana mineral tomando la forma de las cabezas, asegurándolas con el cuerpo en los extremos por medio de remaches.



**Figura 57.** Partes acumulador

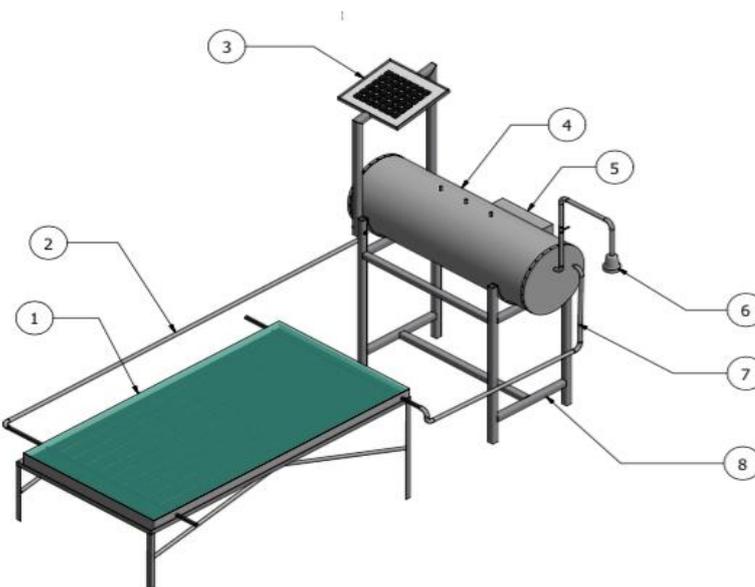
### 5.6.2 Montaje General del Equipo

Finalizado el montaje del acumulador se continúa con el montaje general del equipo acoplándolo al colector solar e implementando el sistema de adquisición de datos (figura 58), la tabla 17 detalla los materiales de montaje.

**Tabla 18.**

Materiales Montaje General

Nro	Descripción
1	Colector Solar
2	Conexión salida Tubo PVC 1/2"
3	Panel Fotovoltaico
4	Acumulador
5	Caja de control
6	Salida de uso (ducha)
7	Conexión entrada Tubo PVC 1/2"
8	Base acumulador



**Figura 58.** Montaje General Acumulador

- Monte acumulador sobre la base
- Realice la conexión del acumulador al colector solar a través de tubería de ½" tanto en entrada y salida del colector solar y acumulador
  - Realice la conexión a red de agua potable a la entrada del acumulador a través de tubería de ½"
  - Realice el montaje de una ducha de uso en la salida agua caliente del acumulador.
- Abra la llave de paso de agua y se comprobó fugas
- Monte Sistema de adquisición de datos
  - Monte la Caja de control a la base de acumulador
  - Monte la Base de panel fotovoltaico a base de acumulador
  - Conecte las galgas biaxiales y termocuplas al circuito de la caja de control
  - Conecte el panel fotovoltaico al circuito de caja de control
  - Conecte el circuito a la pantalla lcd
  - Asegurése que todas las conexiones no estén estropeadas

## 5.7 Colocación sensores

### 5.7.1 Galgas extensiométricas

La galga es adherida a la superficie previamente preparada (figura 59) tan pronto como sea posible para minimizar contaminación. Para su instalación se emplea los siguientes materiales:

**Pinzas:** Se utiliza para impedir el contacto físico con las galgas, asegurando que las mismas no se contaminen con la grasa que existiera en el entorno.

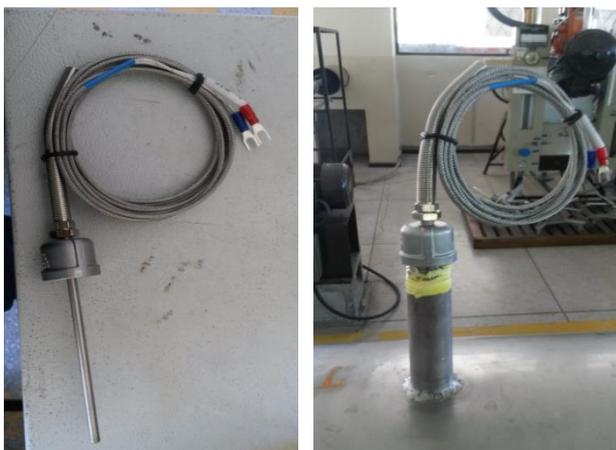
**Cinta adhesiva:** Tiene que ser transparente, ya que nos servirá para poder ubicar la galga de una manera precisa en el material.

**Adhesivo:** Es un pegamento especial para galgas extensiométricas.



**Figura 59.**Colocación galgas en el acumulador

Las termocuplas tipo “J” ingresan al acumulador por medio de tapones acoplados (figura 60), para la termocupla que se colocan en los neplios de ½ pulgada, los cuales van soldados en el cuerpo y cabezas en donde se registra la temperatura de entrada - salida del recipiente y el interior del recipiente



**Figura 60.** Acople Termocuplas

## CAPÍTULO VI

### EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1 CONTROL DE CALIDAD JUNTAS SOLDADAS

##### 6.1.1 TINTAS PENETRANTES

Se aplica ensayos no destructivos que consiste en ciertas pruebas sobre el recipiente, para verificar su calidad sin modificar sus propiedades y estado original.

Estas pruebas, permiten detectar y evaluar discontinuidades o propiedades de los materiales sin modificar sus condiciones de uso o aptitud para el servicio.

Se establece la metodología de prueba por tintas penetrantes (PT) en accesorios para descartar defectos tales como poros, picaduras, fisuras producidas por fatiga o esfuerzos térmicos y fugas en el recipiente abierto a la superficie.

Para ello se aplica la respectiva normativa

- ASME Sección VIII
- ASME Sección V, Artículo 6. Nondestructive Examination.
- ASTM E165. Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination.

#### **Procedimiento:**

Toda prueba PT se realizó utilizando materiales del Tipo II (figura 61), examinación con penetrante visible, método C removible por solventes, para todas las inspecciones en lo accesorios del recipiente



**Figura 61.** Kit tintas Penetrantes

La superficie de examinación debe ser suave y uniforme, libre de salpicaduras de soldadura, escoria, óxido, pintura o grasa.

Posteriormente se debe realizar limpieza con Removedor Cleaner y un trapo libre de pelusas, la superficie debe estar completamente seca antes de la aplicación del penetrante como se indica en la figura 62.



**Figura 62.** Limpieza superficie

Se aplicó el penetrante directamente al área de interés cubriéndola completamente (figura 63). El área de interés corresponderá al cordón de soldadura y  $\frac{1}{2}$  pulgada adyacente al pie de este.

El tiempo de permanencia del penetrante en la superficie de examinación es de 12 minutos de acuerdo a lo especificado por el fabricante.



**Figura 63.** Aplicación Penetrante Accesorios Acumulador

Después del tiempo de penetración requerido, el exceso de penetrante debe ser removido tanto como sea posible, mediante el uso de trapo seco.

Se verificó que la superficie se encuentre completamente seca, sin restos de removedor antes de la aplicación del agente revelador.

Se aplica revelador en la cantidad necesaria para cubrir completamente la superficie de prueba con una capa fina de revelador (figura 64).

La distancia adecuada para la aplicación, no es menor de 12 pulgadas (30 cm). Luego de aplicar el revelador desde la distancia establecida se realiza la examinación de la superficie en el transcurso de 8 minutos como indica el fabricante el tiempo de revelado.



**Figura 64.** Aplicación Revelador

### **Criterio de aceptación y rechazo**

La evaluación se realiza una vez que trascorra el tiempo de revelado, todas las indicaciones son evaluadas según el código ASME sección VIII div.1 párrafo ULT-57 edición 2013. Para verificar la aceptación y el informe correspondiente mirar **ANEXO 11**.

### **6.1.2 Pruebas de ultrasonido**

La inspección por ultrasonido es el método no destructivo comúnmente utilizado. Su principal aplicación es la detección de discontinuidades y defectos internos, también es utilizado para detectar defectos superficiales, para precisar características de la superficie tales como: medida de corrosión y espesor.

Las ondas de sonido viajan a través del material disminuyéndose paulatinamente y son reflejadas a la interface. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades.

### **Procedimiento:**

El equipo de inspección ultrasónica se compone de:

### Equipo básico OLYMPUS EPOCH 1000i (detector de fallas)

- El equipo portátil que se utilizó para este ensayo es robusto que combina poderosas herramientas de ultra-sonidos convencionales y phased array (arreglo de fase) para la detección de defectos superficiales (figura 65).



Figura 65. Equipo de ultrasonido

Se utilizó un palpador de incidencia angular (figura 66) que genera ondas de corte, de superficie y de placa. Se construye acoplando una unidad de haz recto a una de las caras de una zapata de plástico, el cual presenta determinado ángulo de refracción. Su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie de prueba.



**Figura 66.** Palpador

### **Block de calibración**

El ensayo ultrasónico es un método de inspección por comparación, es decir, las indicaciones de las discontinuidades son comparadas con las indicaciones obtenidas en los patrones de referencia. Se utiliza bloques patrones que calibran al equipo y evalúan en forma comparativa de acuerdo a las indicaciones obtenidas de la pieza de ensayo en este caso las soldaduras de cabezas y cuerpo, tal como se muestra en la figura 67.



**Figura 67.** Patrón de calibración

### **Acoplante**

Líquido más o menos viscoso que se utiliza para permitir el paso de las ondas del transductor a la pieza bajo examinación, para este ensayo se utilizara glicerina por su humectabilidad capaz de mojar la superficie al analizar y el palpador (figura 68).



**Figura 68.** Colocación glicerina en la soldadura del acumulador

### **Preparación de la superficie**

El metal base en cada lado de la soldadura debe estar libre de salpicaduras de soldadura (figura 69), irregularidades de la superficie o de material extraño que pudiera impedir el desplazamiento libre y continuo del transductor en la zona de barrido.

El metal de la soldadura donde la superficie interfiera con el examen, la soldadura deberá ser preparada, como sea requerido, para permitir la inspección.

La superficie debe estar limpia y seca.

Cada soldadura seleccionada debe inspeccionarse en toda su circunferencia.

En caso de localizarse una indicación notable, se procederá a realizar una inspección detallada para determinar el tipo, la posición y dimensiones de la discontinuidad.

Si se confirma la existencia del defecto, sobre el cuerpo del elemento y a un costado de la soldadura deberá marcarse la extensión de la sección dañada, el número de identificación asignado al defecto.



**Figura 69.** Procedimiento de Ultrasonido

### **Criterio de Aceptación - Rechazo**

Es necesario ir a la norma ASME V sección 4 en el cual da parámetros de calibración de ganancia de la onda, en esta sección encontraremos la figura T4.3.4.2.1 que nos muestra un bloque de referencia con que se calibra.

Se tomó en consideración los criterios código ASME VIII Div.1 en el párrafo ULW-52 como criterios de aceptación y rechazo. Para mirar el informe de la prueba de ultrasonido observar el **ANEXO 12**.

### **6.2 Prueba hidrostática**

En la norma ASME párrafo UG-99 se encuentra las reglas para realizar las pruebas hidrostáticas.

Se puede optar según el código ASME por dos pruebas la prueba neumática o la prueba hidrostática, pero se realizó la prueba hidrostática, ya que la neumática se realiza en casos especiales donde los recipientes diseñados no pueden con seguridad ser llenados con agua.

La prueba hidrostática para el acumulador se realizó en la empresa TECNOESA S.A en donde fabrican recipientes de metal para gases comprimidos o licuados.

En la empresa mencionada se designó un lugar para realizar las pruebas, que es el banco de prueba hidrostática donde se someten a prueba los cilindros de gas fabricados.

Se colocan tapones en cada una de las aberturas del acumulador para proceder a llenarlo con agua tal como se muestra en la figura 70.



**Figura 70.** Colocación de tapones prueba hidrostática

El acumulador es llenado en su totalidad con agua para verificar si existen fugas en todos los tapones mediante una inspección (figura 71,72).



**Figura 71.** Llenado de agua



**Figura 72.** Colocación de Accesorios para entrada de presión

Se coloca el acople para la entrada de presión proveniente de la bomba (figura 73)



**Figura 73.** Recipiente sometido a presión

Mediante la bomba se comienza a subir la presión gradualmente hasta alcanzar la presión de prueba hidrostática

El recipiente se mantiene a prueba durante diez minutos, durante este tiempo se realiza una inspección visual a presión de prueba, en todas las soldaduras del acumulador tanto de cuerpo como cabezas y conexiones, para detectar posibles fugas (figura 74).



**Figura 74.** Verificación de Fugas

Una vez terminada la prueba se procede a retirar la presión hasta llegar a 0 Psi y vaciarlo completamente.

En el **ANEXO 13** se encuentra el informe proporcionado por TECNOESA S.A el cual ratifica que el acumulador no posee fugas y que está apto para su operación bajo la presión a la cual fue diseñado.

### **6.3 Procedimiento de realización de pruebas**

#### **Determinación patrón de medida galgas extensiométricas**

Las galgas extensiométricas miden tanto las deformaciones del cuerpo como las de la cabeza, la medida que nos proporcionan las galgas es en bits, por lo cual es necesario determinar el patrón de medida que de una analogía entre bits y micro deformaciones, para saber cuánto micros deformaciones contiene un bit.

Para poder determinar este patrón de medida se utilizó un deformímetro con las siguientes características técnicas.

## Deformímetro

TQ Electronics

Switching and Balance Unit E 18

Input 1-25

### Procedimiento

- Conectar cada una de las galgas, transversal, longitudinal de cuerpo y cabeza del acumulador a los canales del deformímetro.
- Calibrar cada uno de los canales del deformímetro que corresponde a las deformaciones longitudinales y transversales del cuerpo y cabeza del acumulador, como se indica en la figura 75.



**Figura 75.** Calibración deformímetro

- Toma de datos a varias presiones inducidas al cilindro mediante un compresor.
- Debido a que las galgas transversales y longitudinales se comportan de distinta manera es necesario sacar un patrón de medida por cada galga.

- Se realiza las conexiones de las galgas al arduino, aplicando presión al acumulador y tomando los datos en bits.

### Cuerpo Acumulador

Las deformaciones unitarias del cuerpo del acumulador tomadas con el deformímetro y arduino a distintas presiones se muestran a continuación en la tabla 18.

**Tabla 19.**

Deformaciones Unitarias del cuerpo del acumulador

Presión (Psi)	Deformación Transversal		Deformación Longitudinal	
	Deformación Unitaria( $\times 10^{-6}$ )	Señal Arduino (bits)	Deformación Unitaria( $\times 10^{-6}$ )	Señal Arduino (bits)
25	42	542	16	504
37,5	80	547	23	518
40	85	549	25	522
95	200	570	58	585

### Cabeza Acumulador

Las deformaciones unitarias de la cabeza del acumulador tomadas a distintas presiones se muestran en la tabla 19.

**Tabla 20.**

Deformaciones Unitarias de la cabeza del acumulador

Presión (Psi)	Deformación Transversal		Deformación Longitudinal	
	Deformación Unitaria( $\times 10^{-6}$ )	Señal Arduino (bits)	Deformación Unitaria( $\times 10^{-6}$ )	Señal Arduino (bits)
25	152	787	120	548
37,5	231	789	172	552
40	245	790	184	556
95	560	802	432	578

#### 6.4 Deformaciones teóricas en el cuerpo del acumulador.

Se calcula la relación diámetro-espesor para conocer si el acumulador es de pared gruesa o pared delgada y realizar los cálculos respectivos según sea el caso.

$$\frac{380}{3} > 40$$

Se puede observar que el cilindro es de pared delgada.

#### Determinación esfuerzos principales cilindros de pared delgada teórico

Para cumplir con la condición de esfuerzo biaxial se tiene que esfuerzo radial  $\sigma_r=0$ .

Se realiza los cálculos con una presión de 40 Psi.

#### Esfuerzo Transversal

Usando la ecuación Nro. 28 se calcula el esfuerzo transversal del cuerpo del acumulador.

$$\sigma_T = \frac{P_i * r_i}{2 * t}$$

$$\sigma_T = \frac{(40 \text{ Psi}) * (14.72 \text{ in})}{2 * (0.118 \text{ in})} = 2494.91 \text{ Psi}$$

#### Esfuerzo longitudinal

Usando la ecuación Nro. 30 se calcula el esfuerzo longitudinal del cuerpo del acumulador.

$$\sigma_L = \frac{P_i * r_i}{4 * t}$$

$$\sigma_L = \frac{(40 \text{ Psi}) * (14.72 \text{ in})}{4 * (0.118 \text{ in})} = 1247,45 \text{ Psi}$$

### Determinación deformaciones cilindro de pared delgada teórico

#### Acero Inoxidable AISI 304:

$$E = 29 * 10^6 \text{ Psi}$$

$$\mu = 0.30$$

#### Deformación transversal

Aplicando la ecuación Nro.29 se calcula la deformación transversal

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T - \mu * \sigma_L}{E}$$

$$\varepsilon_T = \frac{(2494.91) \text{ Psi} - 0.3 * (1247,45) \text{ Psi}}{29 * 10^6 \text{ Psi}} * 1000000 = 78,54 \text{ u}$$

#### Deformación longitudinal

Usando la ecuación Nro.30 se calcula la deformación longitudinal

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L - \mu * \sigma_T}{E}$$

$$\varepsilon_L = \frac{(1247,45) \text{ Psi} - 0.3 * (2494,91) \text{ Psi}}{29 * 10^6 \text{ Psi}} * 1000000 = 18,48 \text{ u}$$

## Determinación esfuerzos teóricos cabeza elipsoidal

### Esfuerzo Meridional

Se calcula el esfuerzo meridional de la cabeza del acumulador mediante la ecuación Nro. 32

$$\sigma_x = \frac{P * R_L}{2 * t}$$

$$\sigma_x = \frac{40 \text{ Psi} * 14,32 \text{ in}}{2 * (0,118)} = 2427,11 \text{ Psi}$$

### Esfuerzo Latitudinal

Se calcula el esfuerzo latitudinal de la cabeza del acumulador mediante la ecuación Nro. 33

$$\sigma_{\phi} = \frac{P * R_L}{t} \left( 1 - \frac{R_L}{2 * R_m} \right)$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{40 \text{ Psi} * 14,32 \text{ in}}{0,118 \text{ in}} \left( 1 - \frac{14,32 \text{ in}}{2 * 3,84 \text{ in}} \right) = -4196,89 \text{ Psi}$$

En este tipo de cabeza cuando R/h es mayor a 1,42 los esfuerzos latitudinales llegan a ser compresivos, entonces el esfuerzo latitudinal es negativo.

## 6.5 Monitoreo y evaluación del sistema de calentamiento

Por medio del monitoreo de temperaturas se analiza el comportamiento real del acumulador de agua sanitaria, como parte de la instalación solar, para ello se va a tomar datos en varias condiciones de clima para establecer las condiciones de uso para este tipo de instalaciones solares que dependen de las siguientes variantes:

- Temperatura ambiente
- Caudal de uso del agua caliente sanitaria
- Presión
- Temperatura del acumulador

Los datos se tomaron a varias temperatura ambiente, siendo nuestra variable fundamental para el estudio de esfuerzos en el acumulador.

### Sistema en funcionamiento

Cuando el sistema está en funcionamiento es decir se está consumiendo el agua, la presión oscila entre los 35 a 40 Psi manteniéndose este valor, independientemente de la temperatura ambiente a la que se encuentre.

### TABULACIÓN DE DATOS

#### Cuerpo Acumulador

A continuación se presenta la tabla 20 con los resultados de las deformaciones unitarias obtenidas a distinta temperatura ambiente.

**Tabla 21.**

Valores de Deformaciones del Cuerpo del Acumulador

Ta °C	Presión(Psi)	T acum	Deformaciones (*10 <sup>-6</sup> )	
			Transversal	Longitudinal
14	37.5	49,25	77	18
15	37.5	49,32	79	21
16	37.5	50	81	22
18	37.5	50	82	22
20	40	51	88	26
24	40	51,02	91	28
26	40	51,56	95	30
29	40	51,79	97	31

### Cabeza Acumulador

A continuación se presenta la tabla 21 con los resultados de las deformaciones unitarias obtenidas a distinta temperatura ambiente.

**Tabla 22.**

Valores de Deformaciones de la Cabeza del Acumulador

Ta °C	Presión(Psi)	T acum	Deformaciones (*10 <sup>-6</sup> )	
			Meridional	Latitudinal
14	37.5	49,25	168	125
15	37.5	49,32	170	126
16	37.5	50	172	132
18	37.5	50	175	135
20	40	51	180	143
24	40	51,02	183	145
26	40	51,56	187	148
29	40	51,79	191	153

### Determinación esfuerzos acumulador

Para el cálculo de los esfuerzos tanto del cuerpo como de la cabeza se utiliza la Ley de Hooke mediante la siguiente expresión.

$$\sigma_L = \frac{E}{1 - \mu^2} * (\epsilon_L + \mu\epsilon_T) \text{ (Psi)} \quad (68)$$

Donde:

$\epsilon_L$ : Deformación Longitudinal

$\epsilon_T$ : Deformación Transversal

## Cuerpo Acumulador

### Esfuerzos Transversales

En la tabla 22 se presenta los resultados de los esfuerzos experimentales del cuerpo del acumulador.

**Tabla 23.**

Esfuerzos Transversales Cuerpo

Ta °C	Esfuerzos (Psi)
14	2625,93
15	2718,35
16	2791,65
18	2823,52
20	3052,97
24	3167,69
26	3314,29
29	3387,58

### Esfuerzos Longitudinales

Los esfuerzos experimentales longitudinales obtenidos mediante la ley de Hooke se presentan en la tabla 23

**Tabla 24.**

Esfuerzos Longitudinales Cuerpo

Ta °C	Esfuerzos (Psi)
14	1309,78
15	1424,51
16	1475,49
18	1485,05
20	1669,89
24	1762,31
26	1864,29
29	1915,27

## Cabeza Acumulador

### Esfuerzos Meridionales

Los resultados de los esfuerzos meridionales experimentales se detallan en la tabla 24.

**Tabla 25.**

Esfuerzos Meridionales Cabeza

Ta °C	Esfuerzos (Psi)
14	4158,79
15	4212,97
16	4219,34
18	4286,26
20	4369,12
24	4445,60
26	4544,40
29	4624,07

### Esfuerzos Latitudinales

Los resultados de los esfuerzos latitudinales experimentales se detallan en la tabla 25.

**Tabla 26.**

Esfuerzos Latitudinales Cabeza

Ta °C	Esfuerzos (Psi)
14	-2377,36
15	-2390,11
16	-2562,20
18	-2629,12
20	-2836,26
24	-2871,32
26	-2928,68
29	-3049,78

## **Factor de seguridad**

Como característica principal en este estudio se tiene que el Acero Inoxidable AISI 304, es un acero austenítico y tiene una excelente ductilidad, cuando la instalación solar se encuentra en uso el acumulador está a una presión de operación entre 37,5 psi y 40 psi.

### **Método de Análisis de diseño para calcular el Factor de Seguridad**

En el método de diseño se tiene que hay que tomar en cuenta el tipo de material y la carga a la cual está sometido el acumulador entonces se tiene que.

- Carga Estática (Biaxial)
- Material Dúctil

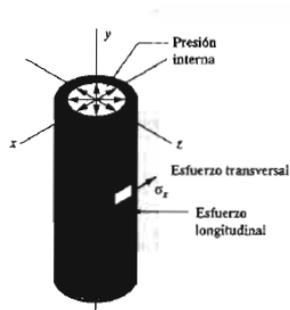
El acumulador se somete a carga estática ya que su presión de operación se mantiene constante.

Para estas condiciones se utiliza el método del esfuerzo cortante máximo que es el empleado en los manuales de recipientes a presión para evaluar la seguridad de los mismos.

## **Esfuerzos Principales**

### **Cuerpo Acumulador**

En el caso de un cilindro de pared delgada sometido a presión interna, los esfuerzos principales son de tensión es decir llevan el mismo signo, como se detalla en la Figura 76.



**Figura 76.** Esfuerzos en cilindros de pared delgada

**Fuente.** (Mott, 2006)

### Esfuerzos Principales

Se toma el valor de los esfuerzos máximos que sufre el cuerpo acumulador bajo una presión de 40 Psi que se encuentran en la tabla 22 y la tabla 23 respectivamente.

$$\sigma_x = 3387,58 \text{ Psi} \quad \text{y} \quad \sigma_y = 1915,27 \text{ Psi}$$

Como no actúan esfuerzos cortantes, los esfuerzos normales sobre las caras perpendiculares son iguales a los tres esfuerzos principales. Si  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  el esfuerzo cortante máximo en el cuerpo del acumulador es.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{3387,58}{2} = 1693,79 \text{ Psi}$$

$$\sigma_1 = \sigma_x = 3005,93 \text{ Psi}$$

$$\sigma_2 = \sigma_y = 1612,52 \text{ Psi}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = 0$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 1693,79 \text{ Psi}$$

### Cabeza Acumulador

Los esfuerzos principales en este caso tienen signo contrario debido a que la relación R/h de la cabeza del acumulador es 2, y provoca que el esfuerzo latitudinal sea de compresión.

$$\sigma_1 = \sigma_x = 4624,07 \text{ psi}$$

$$\sigma_2 = \sigma_y = -3049,78 \text{ psi}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = 0$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 3836,92 \text{ Psi}$$

### Método del Esfuerzo Cortante máximo

Este método es un método conservador de predicción de falla para materiales dúctiles descrito en el manual de diseño de los recipientes a presión de Dennis Moss.

$$\tau_{m\acute{a}x} = S_y/N$$

Donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$  : Esfuerzo Cortante máximo

$S_y$ : Límite de Fluencia 35000 Psi para el acero AISI 304

### Cuerpo Acumulador

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,5 S_y/N$$

$$N = \frac{0,5 * S_y}{\tau_{m\acute{a}x}} = 10,33$$

### Cabeza Acumulador

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,5 S_y/N$$

$$N = \frac{0,5 * S_y}{\tau_{m\acute{a}x}} = 4,56$$

Los esfuerzos en los recipientes a presi3n que se dan debido a la presi3n interna o externa, son llamados esfuerzos de Membrana Primaria y estos est3n limitados por niveles admisibles , si es que sobrepasan estos niveles pueden causar el colapso del recipiente. Estos esfuerzos admisibles se muestran en la figura 77.

Stress Classification or Category	Allowable Stress
General primary membrane, $P_m$	SE
General primary bending, $P_b$	$1.5SE < .9F_y$
Local primary membrane, $P_L$ ( $P_L = P_m + Q_m$ )	$1.5SE < .9F_y$
Secondary membrane, $Q_m$	$1.5SE < .9F_y$
Secondary bending, $Q_b$	$3SE < 2F_y < UTS$
Peak, F	$2S_u$
$P_m + P_b + Q_m^* + Q_b$	$3SE < 2F_y < UTS$
$P_L + P_b$	$1.5SE < .9F_y$
$P_m + P_b + Q_m^* + Q_b$	$3SE < 2F_y < UTS$
$P_m + P_b + Q_m^* + Q_b + F$	$2S_u$

**Figura 77.** Esfuerzos Admisibles para las distintas categorías de esfuerzos

Fuente: (Moss, 2004)

El esfuerzo m3ximo en el cuerpo y la cabeza del acumulador son:

$$\sigma_{x_{cuerpo}} = 3387,58 \text{ Psi}$$

$$\sigma_{x_{cabeza}} = 4624,07 \text{ Psi}$$

$$P_m < SE$$

D3nde:

**S:** Esfuerzo Permissible

**E:** Eficiencia de la Junta

$$\sigma_{x_{cuerpo}} < 15869,5 \text{ Psi}$$

$$\sigma x_{cabeza} < 15869,5 \text{ Psi}$$

### Temperatura del acumulador

La temperatura dentro del acumulador depende de varios factores tales como:

- El uso de agua caliente sanitaria
- Las condiciones climáticas
- La orientación de los paneles

**Tabla 27.**

Temperatura en el interior del acumulador

Tambiente °C	Tacum °C
14	49,25
15	49,32
16	50
18	50
20	51
24	51,02
26	51,56
29	51,79

### Determinación Energía Colector Solar

Para el cálculo de la Energía en el Sistema se utiliza la siguiente ecuación Nro. 15

$$E = m \cdot cp \cdot (T_{uso} - T_{red})$$

Dónde:

$$\dot{m} = Q_{colector} \cdot \rho$$

$$\dot{m} = (3,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}) \cdot 999 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 0.038 \text{ g/s}$$

A continuación se presenta la tabla 27 con los datos experimentales de la energía del colector solar.

**Tabla 28.**

Energía Colector Solar

Ta °C	Tout °C	Energía SST(W)
14	43,95	4,48
15	44,86	4,62
16	46,74	4,91
18	47,9	5,09
20	47,36	5,00
24	47,38	5,01
26	48,36	5,16
29	49,01	5,26

### Determinación Energía Demandada

La energía demandada es la energía en la cual la temperatura de uso deseada es de 45°C que es el valor que se tomó para el diseño del acumulador.

$$E = m \cdot cp \cdot (T_{uso} - T_{red})$$

$$E = 4.64 W.$$

### 6.6 Análisis de resultados

Las galgas se las colocó en el cuerpo del acumulador en la mitad de su longitud total, y en la cabeza a un radio de 50 mm de su centro.

Gráficos Deformaciones

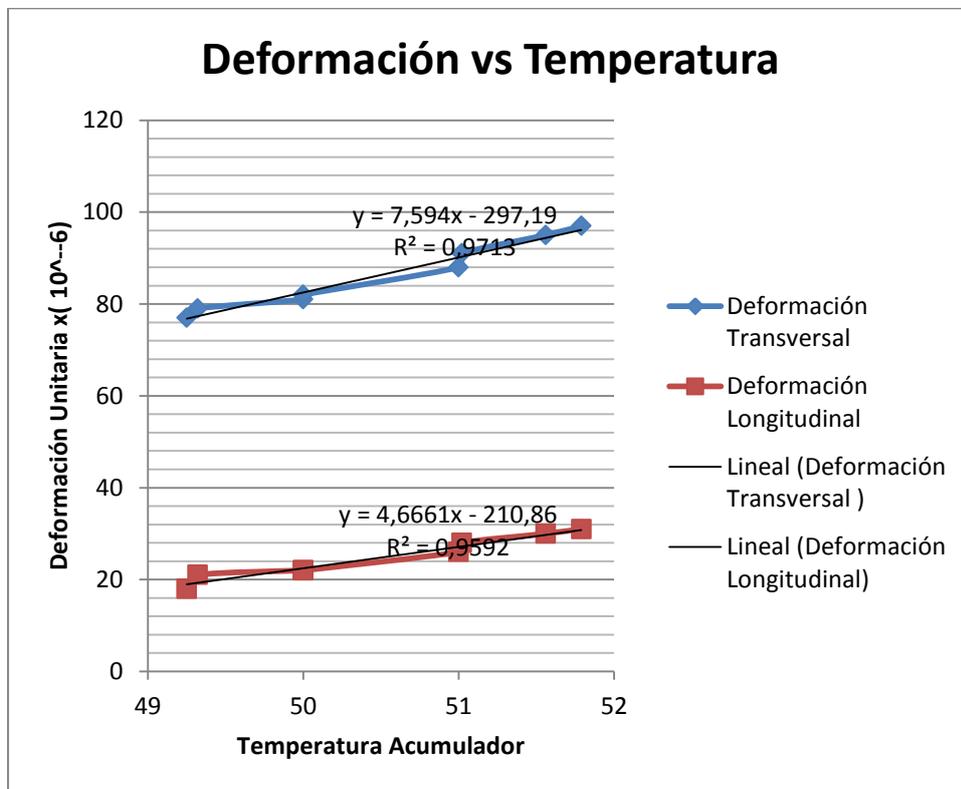


Figura 78. Deformación Cuerpo Acumulador

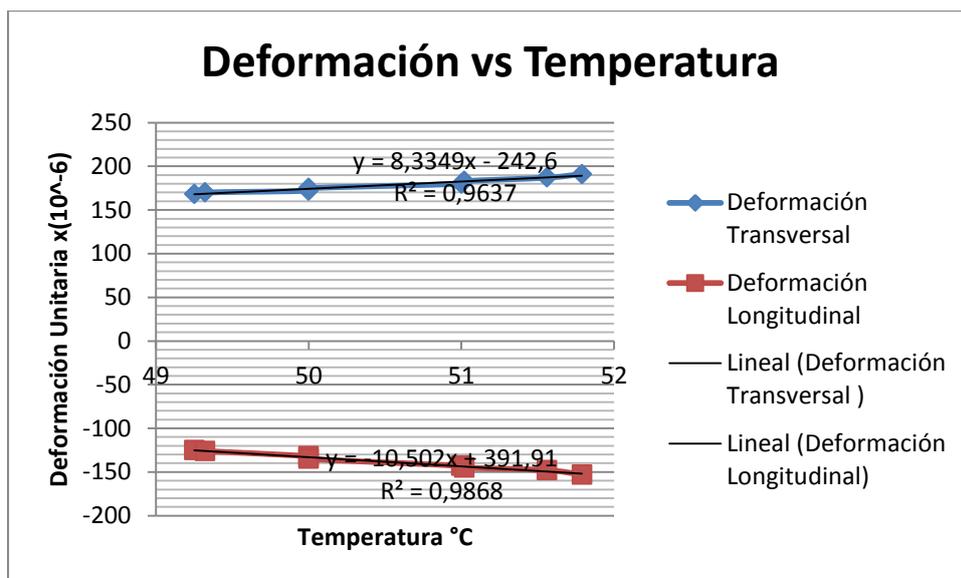


Figura 79. Deformaciones Cabeza Acumulador

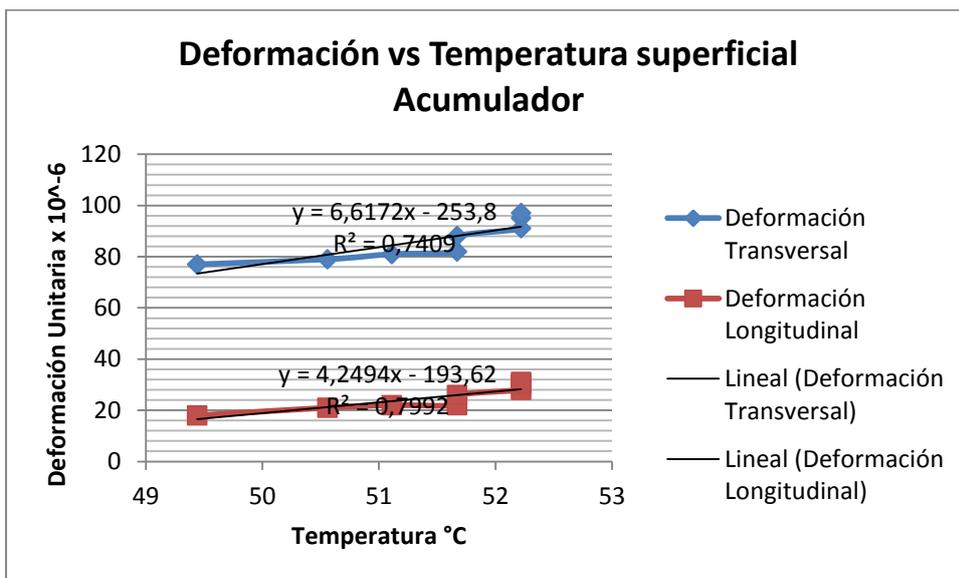


Figura 80. Deformación vs Temperatura superficial cuerpo acumulador

En la gráfica 80 la deformación unitaria es directamente proporcional a la temperatura superficial del acumulador, debido al cambio de temperatura del material que provoca una dilatación térmica. Las deformaciones transversales son mayores que las longitudinales, tanto en el cuerpo como en la cabeza del acumulador.

### Gráficos Esfuerzos

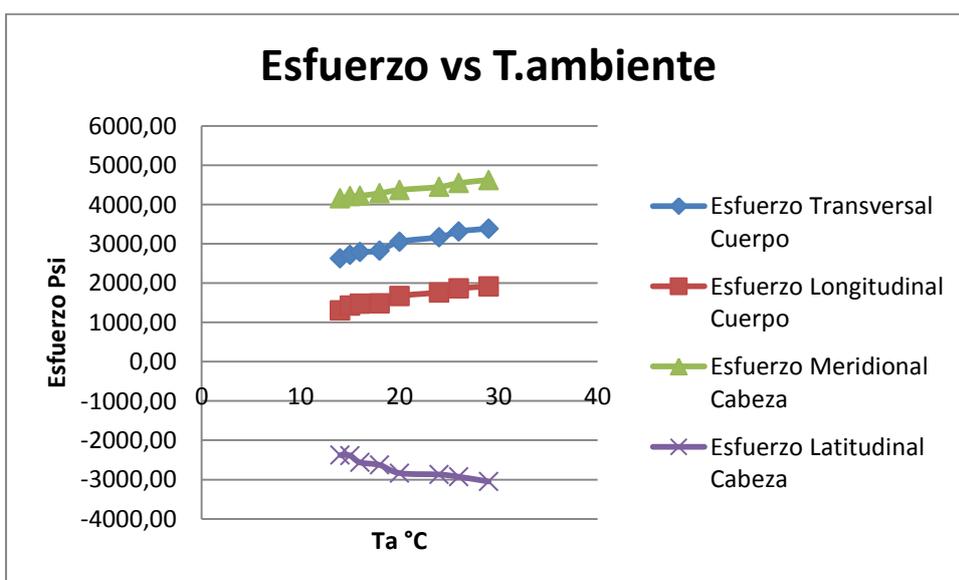


Figura 81. Relación Esfuerzo – Temperatura Ambiental

Los resultados obtenidos de la gráfica 81 indican que cuando la temperatura ambiente es de 29 °C, los esfuerzos alcanzan su máximo valor, en el eje transversal 3387.58 Psi y en el eje longitudinal 1915.27 Psi, el esfuerzo transversal en el cuerpo del acumulador es 1.76 veces mayor que el esfuerzo longitudinal, ya que en un cilindro de pared delgada el esfuerzo transversal siempre es el doble del esfuerzo longitudinal. El esfuerzo máximo en el eje meridional en la cabeza es 4624.26 Psi y en el eje latitudinal el esfuerzo compresivo es -3049.78 Psi.

### **% Elasticidad Acumulador**

#### **Dilatación Radial en un recipiente sometido a presión**

Cuando el acumulador está expuesto a una presión interna existe un crecimiento radial o dilatación la cual se calcula mediante la siguiente ecuación Nro. 34

$$\delta = r * \left( \frac{\text{Esfuerzo Transversal}}{E} - \mu * \frac{\text{Esfuerzo Longitudinal}}{E} \right)$$

#### **Donde.**

p: presión interna

r: radio del acumulador

El acumulador presenta mayor esfuerzo cuando su presión de operación es de 40 Psi y Temperatura ambiente 29 °C en esta caso se daría su mayor elongación cuando la instalación solar está en uso.

$$\delta = \left( 7,36in * \left( \frac{3387,58}{29000000} - 0,3 * \frac{1915,27}{29000000} \right) \right)$$

$$\delta = 7,13 * 10^{-4} in (0,018 mm)$$

El acero inoxidable tiene un alargamiento de 45% antes que sufra la fractura, en este caso el cuerpo del acumulador sufre apenas un alargamiento máximo del 0,0096 %.

### Dilatación cabeza acumulador

La dilatación en las cabezas elipsoidales está dada por la ecuación Nro. 35

$$\delta = \frac{p * R^2}{t * E} \left( 1 - \frac{R^2}{2 * h^2} - \frac{u}{2} \right)$$

$$\delta = \frac{40 \text{ Psi} * 7,36^2 \text{ in}}{0,118 \text{ in} * 29000000} * \left( 1 - \frac{7,36 \text{ in}^2}{2 * 3,68 \text{ in}^2} - \frac{0,3}{2} \right)$$

$$\delta = 0,0184 \text{ mm}$$

Igualmente se tiene el mismo porcentaje de elasticidad que no llega ni al 1%.

### Esfuerzos Teóricos vs Experimentales

En la tabla 28, 29 se detalla los resultados teóricos y experimentales de los esfuerzos del cuerpo del acumulador.

### Cuerpo Acumulador

Tabla 29.

Esfuerzos Transversales Cuerpo

Presión(Psi)	Esfuerzo Experimental Transversal (Psi)	Esfuerzo Teórico Transversal(Psi)
37,5	2823,52	2338,98
40	3387,58	2494,91

**Tabla 30.**

Esfuerzos Longitudinales Cuerpo

Presión(Psi)	Esfuerzo Experimental Longitudinal (Psi)	Esfuerzo Teórico Longitudinal (Psi)
37,5	1485,05	1169,49
40	1915,27	1247,45

**Cabeza Acumulador**

En la tabla 30, 31 se detalla los resultados teóricos y experimentales de los esfuerzos de la cabeza acumulador.

**Tabla 31.**

Esfuerzos Meridionales Cabeza

Presión (Psi)	Esfuerzo Experimental Meridional ( Psi)	Esfuerzo Teórico Meridional (Psi)
37,5	4282,26	3913,72
40	4624,07	4174,64

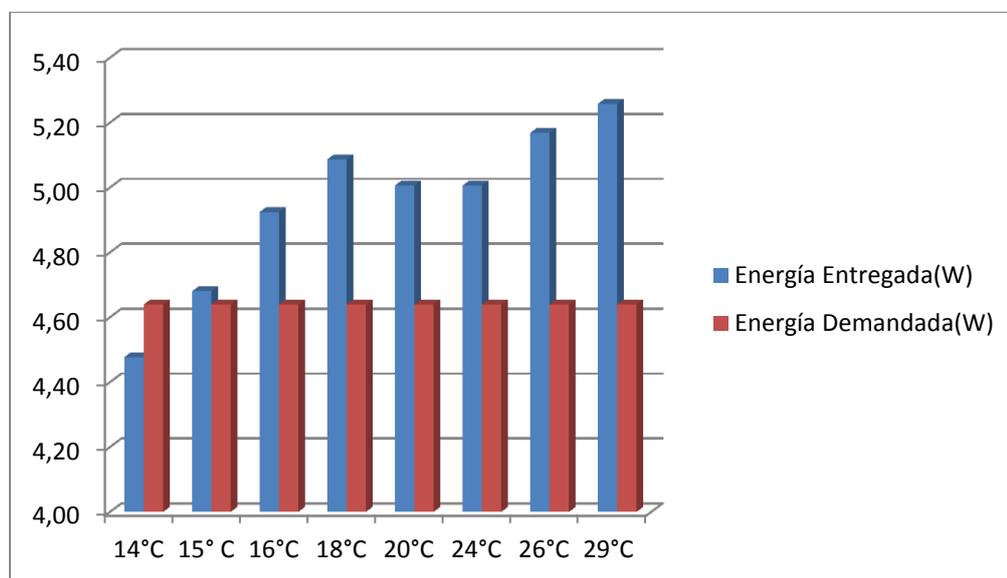
**Tabla 32.**

Esfuerzos Longitudinales Cabeza

Presión (Psi)	Esfuerzo Experimental Longitudinal (Psi)	Esfuerzo Teórico Longitudinal (Psi)
37,5	-2629,12	-2275,42
40	-3049,78	-2427,11

En las tablas **28, 29, 30, 31** los esfuerzos experimentales son mayores que los teóricos en el cuerpo del acumulador, y en la cabeza, debido a los errores de medición de las galgas y el error al momento de calcular el patrón de medida. Hay que tener en cuenta que la teoría del cilindro de pared delgada es de un recipiente sometido a presión, más no de un acumulador de agua caliente sanitaria en el cual existe variación de temperatura tanto del agua de almacenamiento como de la superficie del acumulador, generando esfuerzos térmicos en el recipiente que se suman a los esfuerzos debido a la presión interna.

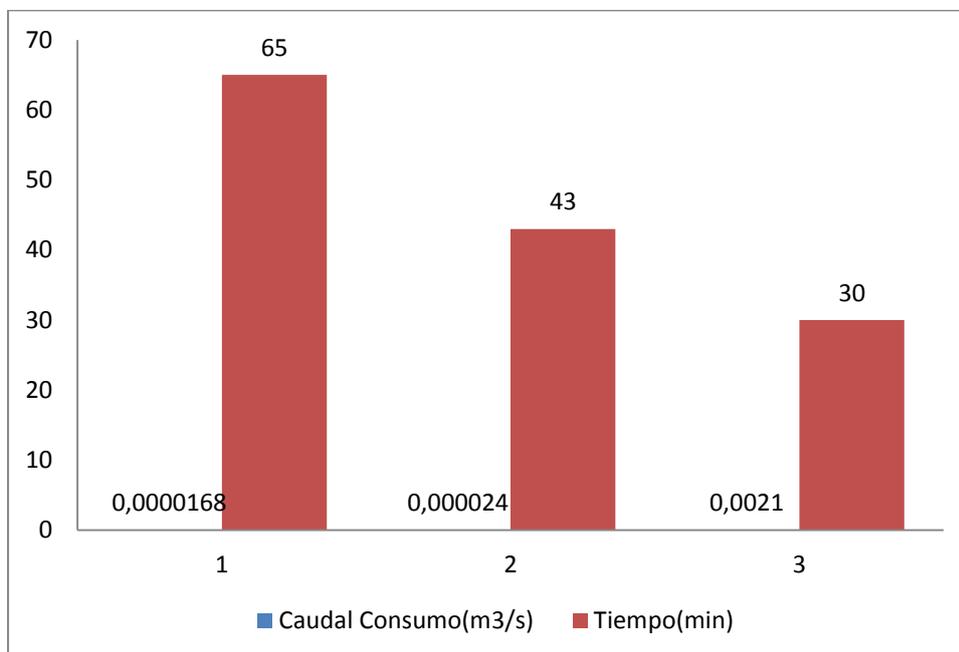
### Relación entre Energía Entregada y Energía Demandada



**Figura 82.** Energía Demandada vs Energía Entregada

En la figura 82 se puede observar que la instalación solar es eficiente, cuando la temperatura ambiente es mayor a 14 C, la energía entregada por el colector solar es 13% superior a la energía demandada cuando el ambiente se encuentra a 29 C, en este caso la temperatura del agua de consumo es mayor a la que se necesita regularmente.

## Consumo de ACS

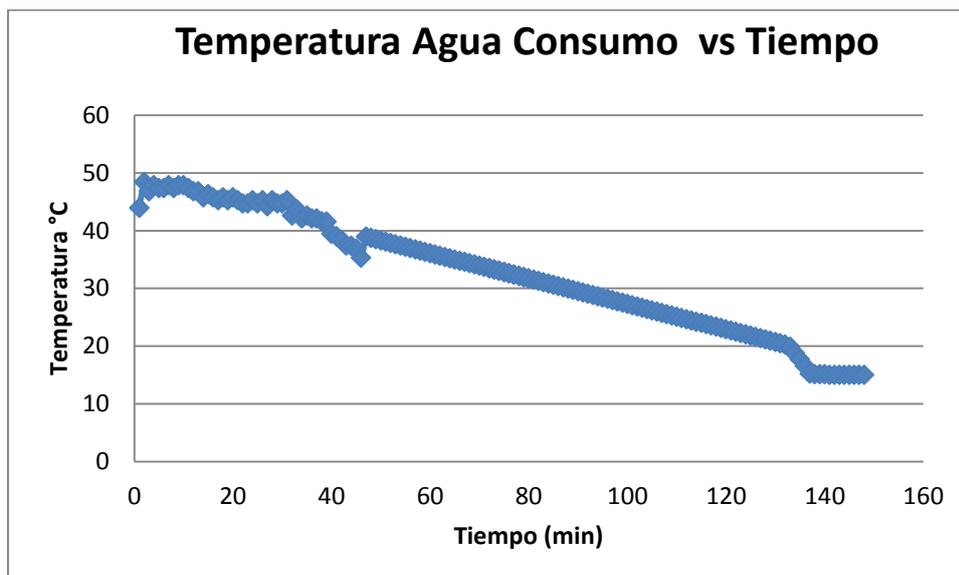


**Figura 83.** Consumo ACS

En la figura 83 se observa el tiempo en que el agua desciende de una temperatura aproximada de 48°C hasta llegar a una temperatura promedio de 32 °C, es decir el tiempo efectivo que tiene la instalación solar para el consumo de ACS.

Una persona ocupa promedio en ducharse 10 min, por lo tanto con un caudal normal de consumo de agua se pueden duchar cuatro personas aproximadamente que es el número de personas para el cual fue diseñado el acumulador.

El caudal del colector es 137 litros /h es decir este se encargará de calentar 137 litros en una hora, para calentar los 140 litros de agua tardará un tiempo aproximadamente de 61 min y así lo hará las 24 horas del día por la recirculación propia del agua, permitiendo tener agua caliente a cualquier hora del día.



**Figura 84.** Relación temperatura de consumo de agua vs Tiempo

Como se puede observar en la figura 84, con un caudal de consumo normal de agua (0,000024 m<sup>3</sup>/min), el tiempo en que el agua tarda aproximadamente en llegar a la temperatura de agua de red es 140 min, independientemente de la temperatura a la que se encuentre el ambiente esto se da debido a que el agua se encuentra almacenada en el acumulador aproximadamente a una temperatura constante, gracias al aislamiento térmico que no permite que exista pérdidas de calor.

#### **b) Sistema almacenado punto crítico**

El análisis de esfuerzos y su relación con las distintas temperaturas tanto en el acumulador como la temperatura ambiente, se lo tiene que realizar en dos etapas, una cuando se está utilizando el agua caliente sanitaria y en la etapa más crítica del acumulador, cuando este almacena el agua sin que haya uso de la misma por varias horas, provocando que la presión dentro del acumulador se incremente hasta 95 Psi y por consiguiente sus deformaciones sean mayores con respecto al análisis anterior.

En este caso la variable principal de análisis es la presión interna del acumulador.

## TABULACIÓN DE DATOS

### Cuerpo Acumulador

En la tabla 32 se muestra las deformaciones unitarias experimentales del cuerpo del acumulador

Tabla 33.

Deformaciones Cuerpo Acumulador

Presión(Psi)	T acum °C	Deformación Unitaria Transversal ( $\times 10^{-6}$ )	Deformación Unitaria Longitudinal ( $\times 10^{-6}$ )
40	51,78	101	36
55	51,96	121	45
60	52,92	128	47
62	53,21	132	51
74	53,33	174	60
83	53,37	183	65
90	53,41	192	70
95	53,41	210	73

### Cabeza Acumulador

En la tabla 33 se muestra las deformaciones unitarias experimentales de la cabeza del acumulador

Tabla 34 .

Deformaciones Cabeza Acumulador

Presión(Psi)	T acum °C	Deformación Unitaria Transversal ( $\times 10^{-6}$ )	Deformación Unitaria Longitudinal ( $\times 10^{-6}$ )
40	51,78	198	162
55	51,96	276	210
60	52,92	300	229
62	53,21	312	235
74	53,33	369	278
83	53,37	415	311
90	53,41	451	340
95	53,41	479	359

## Determinación esfuerzos acumulador

Igualmente se utiliza la Ley de Hooke para determinar los esfuerzos.

### Cuerpo Acumulador

#### Esfuerzos Transversales

Los esfuerzos experimentales se muestran en la tabla 34 ,35.

**Tabla 35.**

Esfuerzos Transversales cuerpo

Presión(Psi)	Esfuerzo Transversal (Psi)
40	3562,86
55	4286,26
58	4528,46
62	4694,18
74	6118,68
85	6453,30
90	6787,91
95	7390,22

#### Esfuerzos Longitudinales

**Tabla 36.**

Esfuerzos Longitudinales cuerpo

Presión(Psi)	Esfuerzo Longitudinal (Psi)
40	2112,86
55	2590,88
58	2721,54
62	2887,25
74	3575,60
85	3820,99
90	4066,37
95	4334,07

## Determinación esfuerzos cabeza Acumulador

### Esfuerzos Transversales

En la tabla 36 se muestra los esfuerzos transversales experimentales.

**Tabla 37.**

Esfuerzos transversales cabeza

Presión (Psi)	Esfuerzo Transversal (Psi)
40	4761,10
55	6787,91
60	7371,10
62	7696,15
74	9101,54
83	10251,98
90	11121,98
95	11832,64

### Esfuerzos Longitudinales

En la tabla 37 se muestra los esfuerzos longitudinales experimentales.

**Tabla 38.**

Esfuerzos longitudinales cabeza

Presión (Psi)	Esfuerzo Longitudinal (Psi)
40	-3269,67
55	-4053,63
60	-4429,67
62	-4506,15
74	-5331,54
83	-5943,41
90	-6523,41
95	-6861,21

### Factor de Seguridad

Para el cálculo de factor de seguridad se toma el máximo esfuerzo que el acumulador experimenta.

- **Cuerpo Acumulador (Esfuerzos Principales tienen el mismo signo)**

$$\sigma_1 = \sigma_x = 7390,22 \text{ Psi}$$

$$\sigma_2 = \sigma_y = 4334,07 \text{ Psi}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = 0$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 3695,11 \text{ Psi}$$

- **Cabeza Acumulador (Esfuerzos Principales tienen signo contrario)**

$$\sigma_1 = \sigma_x = 11832,64 \text{ psi}$$

$$\sigma_2 = \sigma_y = -6861,21 \text{ psi}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = 0$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 9346,92 \text{ Psi}$$

### Método del Esfuerzo Cortante máximo

Este método es un método conservador de predicción de falla para materiales dúctiles.

$$\tau_{m\acute{a}x} = S_y/N$$

Donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$  : Esfuerzo Cortante máximo

$S_y$ : Límite de Fluencia 35000 (**AISI 304**) Psi

**Cuerpo Acumulador**

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,5 Sy/N$$

$$N = \frac{0,5 * Sy}{3695,11} = 4,73$$

**Cabeza Acumulador**

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,5 Sy/N$$

$$N = \frac{0,5 * Sy}{9346,92} = 1,87$$

El esfuerzo máximo en el cuerpo y la cabeza del acumulador son:

$$\sigma_{\mathcal{X}_{cuerpo}} = 7390,22 \text{ Psi}$$

$$\sigma_{\mathcal{X}_{cabeza}} = 11832,64 \text{ Psi}$$

Según las condiciones de Esfuerzos de Membrana Primaria de la figura 77. Se tiene que

$$P_m < SE$$

Dónde:

**S:** Esfuerzo Permisible

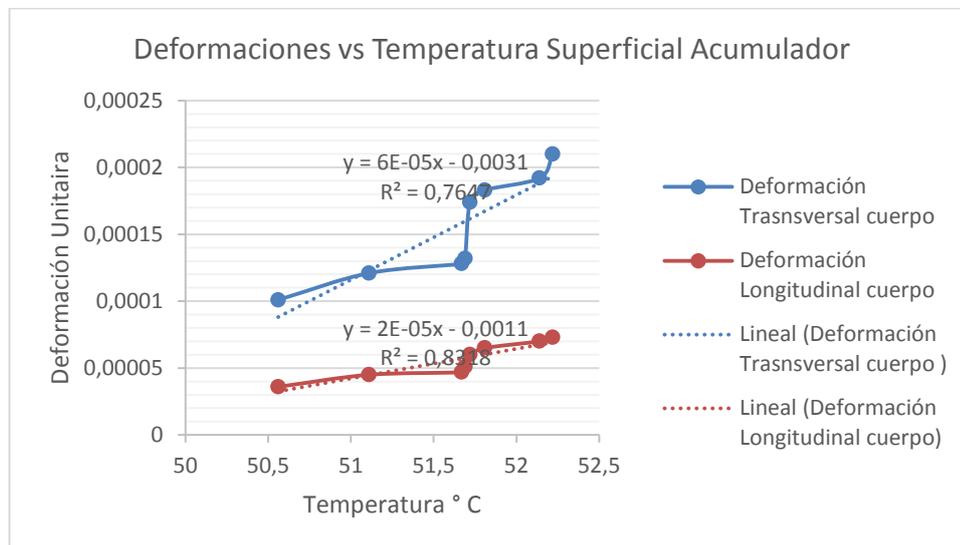
**E:** Eficiencia de la Junta

$$\sigma_{\mathcal{X}_{cuerpo}} < 15869,5 \text{ Psi}$$

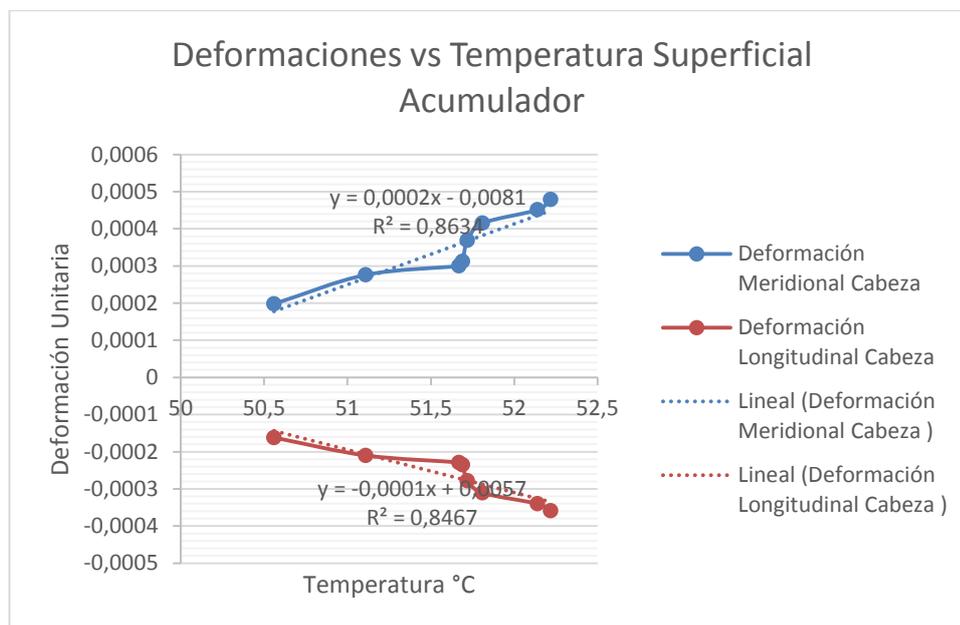
$$\sigma_{\mathcal{X}_{cabeza}} < 15869,5 \text{ Psi}$$

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Gráficos



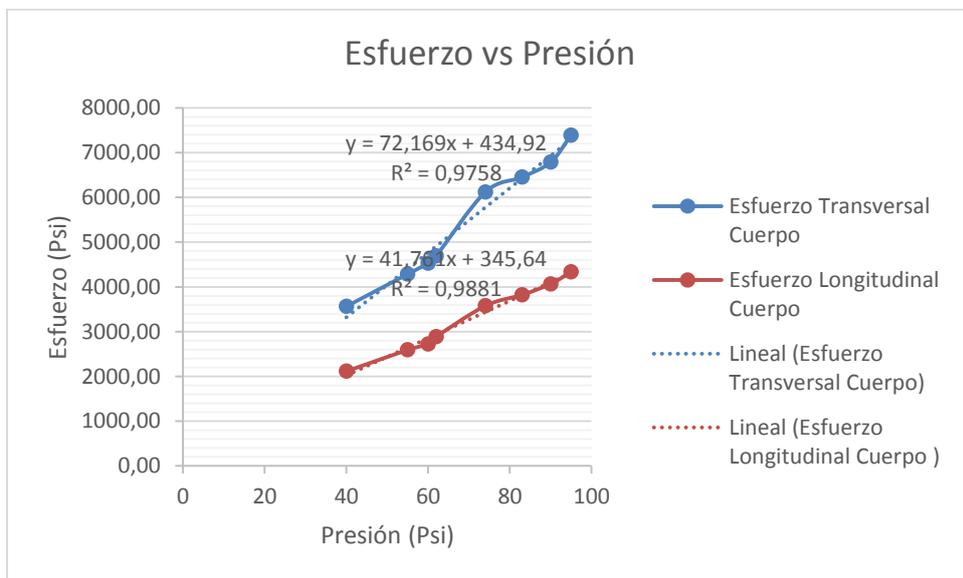
**Figura 85.** Temperatura Superficial acumulador vs Deformación Cuerpo



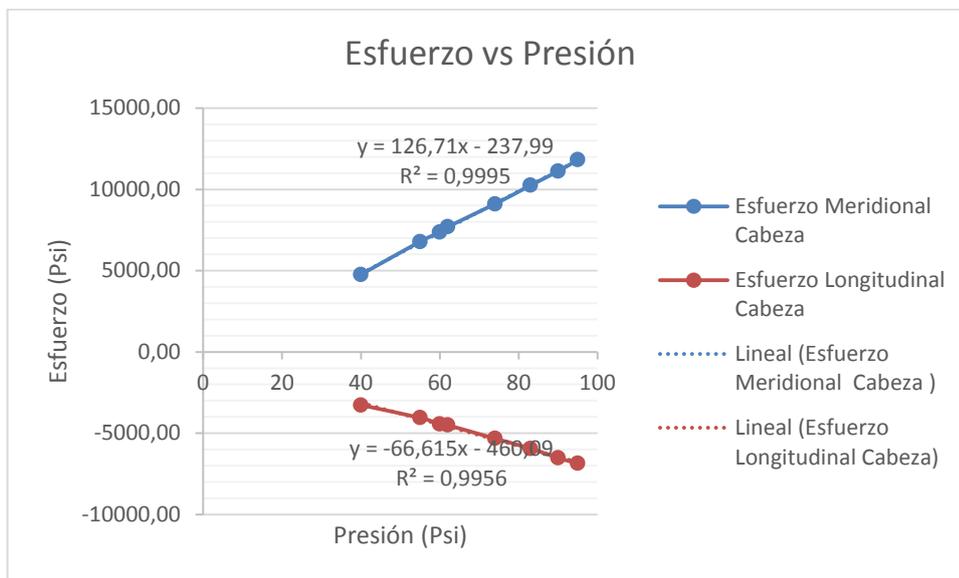
**Figura 86.** Temperatura Superficial acumulador vs Deformación Cabeza

En las figuras 85 y 86 la temperatura superficial del acumulador tiene una variación aproximada de 2 °C, los puntos que se encuentran cercanos en las gráficas son el resultado de un incremento pequeño de temperatura, frente a una variación grande de presión interna del acumulador que

provoca mayor deformación. Las deformaciones unitarias máximas alcanzadas en el cuerpo y cabeza son respectivamente 0,00021 y 0,000479.



**Figura 87.** Esfuerzo vs Presión Cuerpo Acumulador



**Figura 88.** Esfuerzo vs Presión Cabeza Acumulador

En la figura 87 los esfuerzos transversales son 1.70 veces mayor que los esfuerzos longitudinales y en la figura 88 correspondiente a la cabeza del

acumulador los esfuerzos meridionales son 1.72 veces mayores que los latitudinales. La cabeza presenta mayor esfuerzo que el cuerpo del acumulador, estudios han demostrado que las fallas en los recipientes a presión tienen lugar en la zona de la corona de la cabeza elipsoidal debido a pandeo local.

### **% Elasticidad Acumulador**

#### **Dilatación Radial en un recipiente sometido a presión**

$$\delta = r * \left( \frac{\text{Esfuerzo Transversal}}{E} - \mu * \frac{\text{Esfuerzo Longitudinal}}{E} \right)$$

**Donde.**

p: presión interna

r: radio del acumulador

El acumulador presenta mayor esfuerzo cuando alcanza una presión de 95 Psi .

$$\delta = \left( 7,36in * \left( \frac{7390,22}{29000000} - 0,3 * \frac{4334,07}{29000000} \right) \right)$$

$$\delta = 1.54 * 10^{-3} in (0,039 mm)$$

El acero inoxidable tiene un alargamiento de 45% antes que sufra la fractura, en este caso el cuerpo del acumulador sufre un alargamiento máximo del 0,02 % cuando su presión en el interior es la más crítica.

#### **Dilatación cabeza acumulador**

La dilatación en las cabezas elipsoidales está dada por:

$$\delta = \frac{p * R^2}{t * E} \left( 1 - \frac{R^2}{2 * h^2} - \frac{u}{2} \right)$$

$$\delta = \frac{95 \text{ Psi} * 7,36^2 \text{ in}}{0,118 \text{ in} * 29000000} * \left(1 - \frac{7,36 \text{ in}^2}{2 * 3,68 \text{ in}^2} - \frac{0,3}{2}\right)$$

$$\delta = 0,043 \text{ mm}$$

Igualmente se tiene el mismo porcentaje de elasticidad de la cabeza elipsoidal máxima de 0,023%.

## 6.6 Análisis total

**Tabla 39.**

Valores máximos acumulador

T. ambiente	Estado	Presión (Psi)	FS. ( Cuerpo )	FS.(Cabeza)
29°C	Consumo de ACS.	40	10,33	4,56
29°C	Almacenamiento de ACS.	95	4,73	1,87

En la tabla 38, el factor de seguridad tanto del cuerpo como de la cabeza del acumulador disminuye en su mitad aproximadamente, ya que conforme va aumentando la presión interna existen mayores esfuerzos que disminuyen el factor de seguridad.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- El aislamiento térmico de 50 mm permitió que la temperatura de consumo de agua caliente promedio fuera de 46,9 °C a varias condiciones ambientales, como resultado de un buen diseño térmico que minimizó las pérdidas de energía en la instalación solar.
- Los esfuerzos máximos alcanzados en el cuerpo y la cabeza del acumulador en el monitoreo son los siguientes.

#### Cuerpo Acumulador

$$\sigma_x = 7390,22 \text{ Psi}$$

$$\sigma_y = 4334,07 \text{ Psi}$$

#### Cabeza Acumulador

$$\sigma_x = 11832,14 \text{ Psi}$$

$$\sigma_y = 6861,21 \text{ Psi}$$

Estos esfuerzos no superan a los esfuerzos permisibles correspondientes a la categoría de esfuerzos de membrana primaria citados en la figura 77, por lo tanto no existirá falla en el acumulador.

- Se verificó la calidad de las juntas soldadas mediante ensayos no destructivos, las cuales fueron aprobadas por los códigos de aceptación de la norma ASME.
- Mediante la prueba hidrostática realizada a 300 Psi se corroboró que

no existen fugas en las juntas y neoplos de conexión del acumulador

- El Acero inoxidable **AISI 304** posee una gran ductilidad, y presenta una elongación del 45 % de su longitud inicial antes de su fractura, en los casos analizados el acumulador no llega a elongarse ni el 1%, con las deformaciones alcanzadas no va a presentar fractura.

- La diferencia entre los valores teóricos y prácticos de los esfuerzos, se debe también a los errores de medición de las galgas debido a los siguientes factores.

- Superficie de Aplicación mal pulida
- Poco aislamiento de los cables de conexión

## 7.2 Recomendaciones

- Se recomienda hacer un pegado cuidadoso de las galgas extensiométricas en las superficies a analizar, ya que cualquier manipulación puede interferir en las mediciones y provocar un error mayor.

- Se debe previamente realizar consultas de fabricación de recipientes de presión tanto de cuerpo como de cabezas en las metalurgias locales, antes de realizar el diseño ya que los valores de rolado y conformado de cabezas puede diferir a los valores de la norma ASME dependiendo de las capacidades de las máquinas que exista en el país.

- Se debe utilizar las tuberías adecuadas para agua caliente, ya que utilizar las de agua fría puede provocar que la tubería falle, y ocasione un mal funcionamiento de toda la instalación solar.

- Se recomienda en todo tipo de acumuladores de agua caliente, realizar una carcasa resistente y bien sellada, que cubra el aislamiento térmico de factores como lluvia, sol que pueden deteriorar el estado del mismo.

## Bibliografía

- Aparicio, M. P. (2010). *Energía Solar Fotovoltaica*. Barcelona: Marcombo.
- Araujo, L. (2005). *Energía Solar y Eólica*. Madrid: Master -D.
- Areny, R. P. (2003). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Barcelona: Marcombo.
- Benito, T. P. (2012). *El universo de las energías renovables*. Barcelona : Marcombo.
- Buthod, P. (2001). *Pressure Vessel Handbook*. Oklahoma.
- Coughlin, R. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. México : Pearson.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Marcombo.
- F.Megyesy, E. (1989). *Manual de Recipientes a presión : Diseño y Cálculo*. Limusa.
- García, E. M. (1996). *Factores clave en la elección de un acumulador de ACS*.
- García, J. D. (s.f.). *Mantenimiento de Instalaciones solares térmicas*.
- <http://allstudies.com/>. (s.f.). Obtenido de <http://allstudies.com/>:  
<http://allstudies.com/resinas-epoxi.html>
- <http://javiponce-formatec.blogspot.com/>. (s.f.). Obtenido de <http://javiponce-formatec.blogspot.com/>: <http://javiponce-formatec.blogspot.com/2013/03/disenoy-calculo-de-un-deposito-de.html>
- <http://www.ar.all.biz/>. (s.f.). Obtenido de <http://www.ar.all.biz/>:  
<http://www.ar.all.biz/recipientes-para-almacenar-productos-de-petroleo-bgg1080449>
- <http://www.quiminet.com/>. (s.f.). Obtenido de <http://www.quiminet.com/>:  
<http://www.quiminet.com/articulos/la-mejor-manera-de-almacenar-gas-lp-y-evitar-fugas-2800370.htm>
- <http://www.refrigeracionzelsio.es/>. (s.f.). Obtenido de <http://www.refrigeracionzelsio.es/>:  
<http://www.refrigeracionzelsio.es/recipientes-de-liquido/111-tecnac-rh-20.html>
- <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>. (s.f.). Obtenido de  
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>:  
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>

- INAMHI. (s.f.). Obtenido de INAMHI: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* . México: Prentice Hall.
- Jiménez, A. M. (2013). *Dimensionado de instalaciones solares térmicas*. Barcelona : Nobel S.A.
- Juan Carlos Martínez, P. N. (2013). *Manual Técnico de Energía Solar Térmica*. Uruguay.
- L.Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* . México: Prentice Hall.
- María José Montes Pita, M. M. (2014). *Ingeniería Térmica*. Madrid: ISBN.
- Martinez, I. (2011). Tesis de Grado. *Diseño e Instalación de un sistema de calentamiento solar para el sector rural*. Riobama.
- Martínez, P. R. (2010). *Energía Solar Térmica*. Barcelona: Marcombo.
- Michael J, M. ,. (2004). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Barcelona : Reverté.
- Miguel, M. G. (2015). *Instrumentación Electrónica Transductores y Acondicionadores de Señal*. Santander: Universidad Cantabria.
- Moreno, L. M. (2007). *Materiales Industriales Teoría y Aplicaciones* . Madrid: ITM.
- Moss, D. (2004). *Pressure Vessel Design Manual*. Amsterdam: British Library Cataloguing.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Prentice Hall.
- Norma ASME . (2013-2014).
- Omega. (Omega de 2003). Recuperado el Jueves de Agosto de 2015, de Omega: <http://www.omega.com/>
- Piña, R. Q. (2008). Replanteo de Instalaciones Solares Térmicas . Ic.
- Térmica, E. S. (2006). *Javier María Méndez , Rafael Cuervo García*. Madrid: Gráficas Marcar S.A.
- Tous, M. R. (2009). *Energía solar térmica* . Barcelona: CEAC.
- Trujillo, J. E. (2007). *Resistencia de materiales básica para ingniería* . Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- Viloria, J. R. (2013). *Energías Renovables*. Madrid: Nobel.