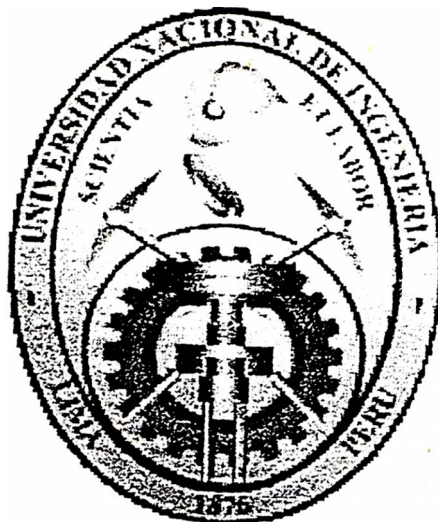


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y MANUFACTURERA**



**“DISEÑO TÉCNICO Y ESTIMACIÓN DE  
COSTOS DE UN EQUIPO PARA ENSAYOS  
DE CORROSIÓN ACELERADOS”**

**T E S I S**

**Para Optar el Título Profesional de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**MARCO ANTONIO ALVARADO MENESES**

Promoción 95 – I

**HUGO ROLANDO GÓMEZ RÍOS**

Promoción 94 – II

**LIMA – PERÚ**

**2000**

*" Este trabajo está dedicado a mis padres, Gerardo  
y Noemí, sin cuyo apoyo no sería posible "*

*Marco Antonio Alvarado Meneses*

*" A mis padres, por su invaluable dedicación,  
apoyo y constancia, este pequeño homenaje "*

*Hugo Rolando Gómez Ríos*

" La voluntad y la perseverancia son las herramientas mas valiosas para lograr el éxito "

R. G.

*\* Nuestro agradecimiento a la valiosa asesoría del Ing. Pedro Pizarro; así como a la constante colaboración del personal del Lab. Corrosión y L. O. U., en particular al Sr. Víctor Rojas*

## *I N D I C E*

	<u>Pgs.</u>
DEDICATORIAS	02
AGRADECIMIENTOS	03
INDICE	04
CAPITULO I : INTRODUCCION	10
CAPITULO II: RESUMEN	12
CAPITULO III: FUNDAMENTOS BASICOS SOBRE CORROSION ATMOSFERICA	14
3.1 CORROSION ATMOSFERICA EN MATERIALES. DEFINICIONES Y VARIABLES QUE LA AFECTAN	14
3.1.1 CORROSION METALICA. MECANISMOS	15
3.1.2 CAUSAS DE LA CORROSION METALICA	16
3.1.3 CORROSION ATMOSFERICA	18
3.2 PREVENCION DE LA CORROSION ATMOSFERICA USO DE RECUBRIMIENTOS	19

3.2.1 DEFINICIONES	20
3.2.2 COMPOSICION DE LAS PINTURAS	20
3.3 SISTEMAS DE PINTURAS.	23
CRITERIOS BASICOS AL RESPECTO	
CAPITULO IV : CAMARA DE PULVERIZACION SALINA PARA ENSAYOS DE CORROSION ACELERADOS	26
4.1 DISPERSIONES DE LIQUIDO EN GAS	26
4.2 DEFINICIONES DE NEBLINA, NIEBLA Y ASPERSIONES.	27
4.3 ENSAYOS DE NIEBLA. RESUMEN DE LAS DIFERENTES NORMAS EXISTENTES.	28
4.4 OBJETIVOS DE LOS ENSAYOS DE PULVERIZACION SALINA.	31
4.5 COMO TRABAJA LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA.	31

4.6 DESCRIPCION DEL EQUIPO. PRINCIPALES PARAMETROS A CONSIDERAR.	33
4.7 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA	34
CAPITULO V : DISEÑO DE EQUIPOS QUE CONFORMAN LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA	35
5.1 ANTECEDENTES DEL SISTEMA ACTUAL	35
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS	36
5.3 DISEÑO DE LA COLUMNA DE HUMIDIFICACION	40
5.3.1 DETERMINACION DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO	41
5.3.2 CALCULO DE LA ALTURA OPTIMA DE LA COLUMNA Y TIEMPO DE CONTACTO.	44
5.3.3 CALCULO DEL DIAMETRO DE BURBUJA PARA QUE SE LOGRE 98% H.R. EN LA COLUMNA	48

5.3.4	CALCULO DEL DIAMETRO DE BURBUJA REQUERIDO PARA QUE ESTA ALCANCE LA TEMPERATURA DEL LIQUIDO.	50
5.3.5	CALCULO DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL AGUA DE LA COLUMNA.	51
5.3.6	PREDICCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS GOTITAS PRODUCIDAS POR LA TOBERA EN LA CAMARA	52
5.4	DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES DE SALMUERA	54
5.5	DISEÑO DE LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA.	55
5.5.1	DIMENSIONES DE LA CAMARA DE PULVERIZACION.	55
5.5.2	SELECCIÓN DE LA TOBERA ATOMIZADORA.	56
5.5.2.1	ESTIMACION DE LA PRESION PRODUCIDA A LA SALIDA DE LA TOBERA (VACIO)	57
5.5.2.2	CALCULOS EFECTUADOS EN LA SELECCIÓN DE LA TOBERA CONVERGENTE	59

5.5.3 SISTEMA DE DISPERSION. LOCALIZACION.	62
5.5.4 POSICION DE LAS MUESTRAS EN LA CAMARA.	63
5.5.5 SOLUCION SALINA DE PULVERIZACION.	63
5.5.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCION DE LA CAMARA.	64
5.5.6.1 CALCULO USANDO CHAQUETA DE AGUA	64
5.5.6.2 CALCULO USANDO CHAQUETA DE AIRE	81
5.6 SELECCIÓN DEL COMPRESOR DE AIRE	97
5.7 DETERMINACION DE LOS MATERIALES A USAR EN LA FABRICACION DE LA CAMARA.	100
5.8 DIAGRAMA FINAL DEL SISTEMA PLANTEADO	101
CAPITULO VI : ESTIMACION DE COSTOS.	102
6.1 CRITERIOS DE DECISION PARA LA REALIZACION DEL PROYECTO	103
6.2 BALANCE DE GASTOS A REALIZAR	104
6.2.1 ADQUISICIÓN DE BIENES PARA EQUIPAMIENTO	104
6.2.2 ADQUISICIÓN DE SERVICIOS PARA REALIZAR EL EQUIPAMIENTO	106



6.2.3 BALANCE TOTAL DE GASTOS A REALIZAR	107
6.3 INGRESOS POR PRESTACION DE SERVICIOS	107
CAPITULO VII : CONCLUSIONES FINALES	109
CAPITULO VIII : BIBLIOGRAFIA UTILIZADA	114

### **APENDICES**

* SIMBOLOGIA USADA.	119
* TABLAS Y FIGURAS SOBRE LAS CORRIDAS DE PRUEBA USANDO LA COLUMNA PROTOTIPO DE HUMIDIFICACION.	125
* DIAGRAMAS DE DISEÑO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS , SISTEMAS DE CONTROL, Y DE CALEFACCION.	136

## ***CAPITULO I.- INTRODUCCION***

En la mayoría de países con gran desarrollo industrial, desde hace 40 años las actividades en el campo de la “Lucha contra la Corrosión”, se han ido extendiendo rápidamente y se ha hecho imprescindible la difusión de los conocimientos sobre “La Corrosión y su Protección”.

Afortunadamente las grandes pérdidas económicas causadas por la corrosión pueden ser reducidas, y aunque no eliminadas si pueden ser minimizadas y/o controladas a través de diversos métodos; el más práctico y económico lo constituye la aplicación de recubrimientos, de allí que se pueda comprobar que por cada 100 metros cuadrados de superficie metálica expuesta a un medio corrosivo, 85 a 90 metros cuadrados están protegidos por “*recubrimientos orgánicos*”, también denominados *Pinturas* <sup>(1)</sup>.

La selección del tipo de recubrimientos es un aspecto vital e importante en la protección de la corrosión, la cual implica un número de operaciones y decisiones de parte de los ingenieros de mantenimiento, contratistas y de los fabricantes. En cada caso, la decisión requiere de cuidadosa consideración de varios factores, siendo uno de los más importantes el conocimiento de las propiedades que posee

el recubrimiento a usar, estas características inherentes a cada pintura nos permitirán tener la certeza de que el sistema seleccionado es el más eficaz contra los problemas de corrosión que puedan presentarse posteriormente.

Actualmente existen muchas pruebas de Laboratorio destinadas a evaluar las propiedades de diferentes tipos de recubrimientos de materiales, bajo ciertas condiciones similares a las que realmente estarán expuestos. El resultado de estos ensayos determinará la eficacia del sistema utilizado y/o las ventajas de su aplicación según sus características y propiedades.

Entre los ensayos usuales a recubrimientos están aquellos que determinan su resistencia a la permanencia en condiciones atmosféricas agresivas, en este caso las pruebas son de carácter comparativo entre materiales y recubrimientos, y determinan la resistencia en el tiempo a estos medios; en tal consecuencia los equipos a utilizar deben simular en lo más posible las condiciones de trabajo a fin de tener resultados óptimos.

Nuestro proyecto tiene como principal objetivo el diseño del sistema necesario para realizar ensayos de corrosión acelerados en un ambiente de niebla salina (empleado en la industria de pinturas); esta prueba es fundamental para recubrimientos que van a estar expuestos a medios marinos altamente corrosivos.

## ***CAPITULO II.- RESUMEN***

El presente Proyecto de Tesis se encargará del Diseño Técnico y Estimación de Costos de una Cámara de Pulverización Salina para ensayos de corrosión acelerados, bajo las normas ASTM B117 (cuyos equivalentes son : DIN 50 021 y JIS Z 2371), ASTM B287, ASTM B368 y ASTM G43. Todas estas pruebas simulan ambientes marinos, industriales y rurales donde la corrosión de superficies tiene mayor ocurrencia .

Estos ensayos son los más usados para evaluar la resistencia de los recubrimientos en los ambientes antes mencionados.

Los principales equipos que conforman la Cámara de Pulverización Salina son <sup>(2)</sup>

- \* La Cámara o Gabinete de formación de niebla.
- \* El Tanque de solución a atomizar.
- \* La Columna de Humidificación.
- \* El Sistema de Atomización.

Diferentes corridas de prueba se han efectuado en un equipo ya existente en el Laboratorio de Corrosión de la F.I.Q.M. - U.N.I., con ello se determinarán y ajustarán las variables y parámetros para el dimensionamiento de la nueva cámara. Se reemplazaron algunas partes del actual equipo, tal como la columna de humidificación donde ocurre la saturación del aire.

Asimismo, se determinará el Sistema de Calefacción para mantener la Cámara de Pulverización a la temperatura de prueba requerida. Finalmente, con las pruebas realizadas, y de los cálculos y resultados que se desprendan de ellas se presentará el modelo teórico de la Cámara de Pulverización Salina (ecuaciones de diseño y diagramas ), que permitirá obtener ensayos acordes con la normas indicadas.

## ***CAPITULO III.- FUNDAMENTOS BASICOS SOBRE CORROSION ATMOSFERICA***

La Industria lucha diariamente contra un enemigo común : **La Corrosión.**

Cada año esta fuerza desintegradora ocasiona pérdidas de millones de dólares a la Marina y a la Industria en general. Las mayores pérdidas causadas por la corrosión son

- Paralización de la actividad productiva
- Bajo rendimiento de las instalaciones
- Pérdidas y explosiones provocadas por fugas, etc.

Estas pérdidas superan los gastos ocasionados por el mantenimiento y reposición de partes malogradas.

### **3.1 CORROSION ATMOSFERICA EN MATERIALES.**

#### **DEFINICIONES Y VARIABLES QUE LA AFECTAN**

**La CORROSION**, en términos generales es la destrucción o deterioro de un material a causa de su combinación o reacción (procesos químicos o

electroquímicos), con el medio ambiente. En este sentido, puede hablarse de corrosión no sólo en los metales sino también en los cementos, plásticos, materiales cerámicos, etc. Por otro lado, la clase del medio que rodea al material incide notablemente en la intensidad de la corrosión dependiendo de que el aire sea mas o menos húmedo (corrosión atmosférica), de que el material esté rodeado de agua de mar, álcalis, ácidos u otras sustancias contaminantes.

En relación a los materiales metálicos podemos definir la corrosión como la destrucción de un metal por causas distintas de la acción mecánica. Por ello, no puede considerarse como corrosión el deterioro de un metal debido a procesos netamente mecánicos (erosión, rozamiento, etc.).

No obstante, estas causas pueden actuar conjuntamente con otros fenómenos de índole químico y electroquímico dando lugar a diversos tipos de corrosión corrosión-erosión, corrosión por rozamiento, corrosión bajo tensión, fatiga con corrosión, entre otras <sup>(3)</sup> .

### 3.1.1 CORROSION METALICA. MECANISMOS

La Corrosión metálica se puede clasificar de diversos modos, obedeciendo a criterios muy variados; sin embargo en esencia, cabe distinguir dos procesos de

corrosión marcadamente distintos, tanto en los mecanismos de ataque como a las condiciones experimentales en que se desarrollan

- Corrosión a alta temperatura.
- Corrosión electroquímica.

En el primer caso, también denominada corrosión seca, el metal reacciona directamente con el agente agresivo ( $O_2$ ,  $SO_2$ , etc.), afectando el ataque de manera similar a toda la superficie metálica.

En cambio en la electroquímica o corrosión húmeda, se produce cuando el metal se halla en contacto con electrolitos (agua, álcalis, soluciones salinas, etc.).

### 3.1.2 CAUSAS DE LA CORROSION METALICA

Se acepta generalmente a la corrosión como un fenómeno electroquímico que implica la existencia de pilas de corrosión, debido a las heterogeneidad en las diferentes zonas del metal o del medio corrosivo en contacto con su superficie <sup>(4)</sup>.

Las principales heterogoneidades del metal que pueden provocar corrosión electroquímica son



- De constitución : fases dispersas en la matriz metálica de diferente composición química que aquella, segregaciones, etc.
- De estructura : anisotropía de los granos cristalinos, bordes de grano, dislocaciones emergentes, tamaño de grano, etc.
- Mecánicas : regiones de metal deformado en frío, zonas de metal bajo tensión externa, etc.
- A diferentes estados superficiales : partículas contaminantes de la superficie, uniones bimetálicas, discontinuidades en películas que cubren el metal, grado de pulido, rayaduras, etc.

Las heterogeneidades del medio corrosivo pueden resultar de

- Diferencias de temperatura.
- Diferencias en concentración salina, composición, o pH.
- Diferencias de concentración de oxígeno (aireación diferencial).
- Movimiento de líquido.
- Presencia de agentes especialmente corrosivos.
- Acciones mecánicas simultáneas.
- Corrientes eléctricas vagabundas.
- Radiaciones.
- Agentes biológicos, etc.

### 3.1.3 CORROSION ATMOSFERICA

La acción de la atmósfera sobre los metales constituye uno de los mayores problemas planteados por la corrosión.

La velocidad de corrosión de los metales en la atmósfera pueden ser decenas e incluso centenares de veces mayor en unos lugares que en otros dependiendo del tipo de atmósfera de que se trate.

La magnitud de la corrosión depende fundamentalmente del tiempo durante el cual la superficie aparece húmeda, aunque en realidad queda fijada por una combinación de factores: lluvia, humedad relativa, temperatura, condiciones de exposición, contaminación atmosférica, composición del metal, propiedades del óxido formado, etc.

El proceso de corrosión atmosférica es la suma de los procesos parciales (individuales) de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal <sup>(4)</sup>.

Resumiendo, entre los factores que determinan primariamente la intensidad del fenómeno están :

- 1) La vida de la película del electrolito sobre la superficie del metal,

- 2) La composición química de la atmósfera (contaminación del aire con gases, vapores ácidos y aerosoles de agua de mar),
- 3) La temperatura ambiente.

La participación de gran número de otros factores es generalmente secundaria.

### 3.2 PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

#### USO DE RECUBRIMIENTOS

Todos los procedimientos de protección anticorrosiva tienden, o bien a evitar a formación de elementos galvánicos o bien a impedir el ataque de sustancias que descompongan químicamente a los materiales de construcción. Las sales son promotores activos de la formación de elementos galvánicos, de allí que debido a que la brisa marina y el agua de mar contienen sales, la prevención de la corrosión en las estructuras de acero de las embarcaciones e instalaciones industriales en estas zonas demanda un mayor cuidado en la planificación y realización de la protección contra la corrosión.

El método más extensamente empleado y el que asegura mejores resultados es el uso de recubrimientos externos o Pinturas.

### 3.2.1 DEFINICIONES

Denominamos *Pinturas* a un conjunto de productos industriales que se presentan en estado líquido pastoso o sólido en polvo, y que aplicados en forma de recubrimiento superficial sobre cualquier tipo de objeto o material, se transforman mediante procesos físicos o químicos, en una película sólida adherida continua y duradera cuya finalidad es ser protectora, estética o alguna otra técnicamente específica

Desde un punto físico-químico puede definirse a una pintura como una dispersión uniforme de un sólido finamente dividido (pigmento) en un medio físico denominado vehículo. A su vez, este vehículo está constituido por un material formador de película (resina, aceite, o una combinación de ambos) y una mezcla solvente. La función de este último es permitir la preparación de la pintura y su posterior aplicación. Un material no pigmentado se denomina barniz <sup>(5)</sup>.

### 3.2.2 COMPOSICION DE LAS PINTURAS

Las pinturas están formadas por una parte líquida (vehículo), y una parte sólida (pigmentos y extendedores). El **vehículo**, por lo general está formado por <sup>(5)</sup> :

- a) *LIGANTES* : Pueden ser aceites, resinas naturales y sintéticas. Entre las resinas sintéticas más usadas cabe mencionar, por las cualidades y resistencia

especiales que confieren : las alquídicas, las epóxicas, las fenólicas, las a base de cloro-caucho y los co-polímeros vinílicos, entre otras.

b) *PLASTIFICANTES* : Son sustancias que tiene la propiedad de dar elasticidad y flexibilidad a la película.

c) *SOLVENTES Y DILUYENTES* : Son compuestos orgánicos volátiles cuya finalidad es la de solubilizar a los ligantes y dar a la pintura las características óptimas para facilitar su aplicación, entre los principales tenemos a los hidrocarburos alifáticos (aguarrás mineral) y aromáticos (xilol, toluol, etc), los alcoholes (propanol y butanol), cetonas (metil-etil-cetona, acetona, etc.).

d) *ADITIVOS O AUXILIARES* : Permitan dar a la pintura características particulares para optimizar su servicio. Entre los principales aditivos tenemos : los secantes, los emulsionantes, los agentes que favorecen la humectación del soporte metálico, los antioxidantes, los estabilizadores de las resinas, los antiespesantes, etc.

Los **Pigmentos o Extendedores** (parte sólida), están constituidos por determinadas sustancias que son finamente dispersadas en el vehículo.

Los Pigmentos por sus propiedades se subdividen en :

a) *ACTIVOS* : Con la función principal de evitar y detener el proceso de la corrosión. Los pigmentos activos se diferencian según el tipo de mecanismo, mediante el cual lleva a cabo su acción anticorrosiva, en :

- De Protección Catódica
- De Acción pasivante
- De Acción oxidante

b) *PASIVOS* : Se caracterizan por su elevada resistencia química a los agentes atmosféricos y tiene como función la de dar poder cubridor y color a las pinturas. Son pigmentos inertes muchos de ellos óxidos metálicos tales como : dióxido de titanio, óxido de fierro, óxido de cromo, etc.; algunas sales inorgánicas, la mayor parte de los pigmentos orgánicos, negros de humo y los grafitos.

*EXTENDEDORES* Tiene la función de dar a las pinturas determinadas características físicas y mecánicas, tales como resistencia a la intemperie, resistencia a la humedad, mejoran la viscosidad y evitan el asentamiento de la pintura dentro de su envase, entre otras. Los extendedores son silicatos complejos (micas, talco, asbesto, caolín, etc.), óxidos metálicos (de cuarzo y aluminio), carbonatos naturales y precipitados.

### 3.3 SISTEMA DE PINTURAS

#### CRITERIOS BASICOS AL RESPECTO

Un **Sistema de Pinturas**, es un conjunto de dos o más capas de pintura aplicadas sobre una determinada superficie para protegerla <sup>(5)</sup> . Las características de un sistema eficiente se pueden resumir en

- a) Excelente adhesión a la superficies a proteger.
- b) Excelente poder anticorrosivo.
- c) Limitada porosidad.
- d) Resistencia en el transcurso del tiempo a los agentes atmosféricos y químicos.

Para la aplicación de un Sistema de Pinturas, se debe seguir un **Sistema de Pintado**, el cual se puede efectuar después de las etapas de preparación y acondicionamiento de la superficie a pintar <sup>(6)</sup>

Estas etapas previas comprenden

#### 1. Preparación de la superficie, por diversas métodos :

- Arenado al metal blanco (SSPC-SP5-63)
- Arenado comercial (SSPC-SP6-63)
- Limpieza a fuego (SSPC-SP4-63)
- Limpieza con equipo mecánico (SSPC-SP3-63)

- Limpieza con instrumentos manuales (SSPC-SP2-63)
- Limpieza con ácidos (SSPC-SP8-63)
- Limpieza con solventes (SSPC-SP1-63)

2. Cuando el Sistema de Pintado así lo exige : Un pre-tratamiento químico de la superficie, mediante la utilización de un Wash Primer con 0.3 a 0.5 mils de espesor seco, deberá usarse previamente a la aplicación de los anticorrosivos.

Generalmente, un Sistema de Pinturas consta de las siguientes capas <sup>(6)</sup> :

- 1.- Capa Primaria : Imprimante o Fondo Anticorrosivo.
- 2.- Capa Intermedia o Ligante.
- 3.- Capa Final o de Acabado

Estas capas del Sistema son generalmente aplicadas en las siguiente forma:

- 1.- Una o dos capas de fondo con especifica función anticorrosiva y de sólido anclaje entre la superficie metálica a cubrir y las capas siguientes de pintura.
- 2.- Una o más capas intermedias con la función principal de completar el espesor necesario para aislar las capas de acabado del metal y en caso de que sea necesario por su composición, la capa intermedia puede brindar protección anticorrosiva.



3.- Una o más capas de acabado con la función específica de proteger la superficie recubierta con las capa de fondo y la capa intermedia, contra los agentes exteriores, según el uso de dicha superficie.

Los Sistemas de Pinturas más empleados en la industria son

- Sistemas Alquídicos y sus modificaciones.
- Sistemas Epóxicos y sus modificaciones.
- Sistemas Vinílicos y sus modificaciones.

## ***CAPITULO IV.- CAMARA DE PULVERIZACION SALINA PARA ENSAYOS DE CORROSION ACELERADOS.***

### **4.1 DISPERSIONES DE LIQUIDO EN GAS.**

Hay tres tipos de dispersiones distintas de líquido en gas, que tienen interés práctico en las industrias de procesos

- a) Aspersiones producidas por toberas y otros sistemas de atomización para la combustión, la transferencia de masa y calor o el recubrimiento de superficies.
- b) El arrastre generado por el burbujeo de un gas o a través de un líquido, como en un rehervidor de caldera o una torre de destilación.
- c) Nieblas generadas de gases que están supersaturados (condensación).

Las dos primeras comparten la dependencia de la división física; ésta división, en la práctica, suele ser un proceso de combinación que incluye la producción y desintegración de columnas, láminas y gotas<sup>(7)</sup>.

#### 4.2 DEFINICIONES DE NEBLINA, NIEBLA Y ASPERSIONES.

Las partículas de *Neblina*, se define como una serie de partículas líquidas suspendidas en un gas con diámetros menores de 10 micras.

Las partículas de *Niebla*, se definen como partículas líquidas suspendidas en un gas con diámetros que oscilan entre 1 y 100 micras aproximadamente.

Las partículas rociadas o de aspersión, se definen como partículas líquidas suspendidas en un gas con diámetros mayores a 10 micras, por lo que la Niebla cae dentro de este rango de tamaño. Esta clasificación es bastante arbitraria, pero se acepta en general <sup>(8)</sup>

Las dispersiones de líquido en gas que se encuentran en las operaciones químicas están en los intervalos de neblinas y de aspersiones, las que consisten en partículas con diámetros que van desde 0.1 a 5000 micras aproximadamente <sup>(7)</sup>.

En nuestro caso específico, la niebla es generada por la pulverización de la solución producida en una tobera de dos fluidos.

#### 4.3.- ENSAYOS DE NIEBLA. RESUMEN DE LAS DIFERENTES NORMAS EXISTENTES

Existen muchos tipos de ensayos de pulverización salina, todos operan bajo el mismo principio general. En algunas pruebas las muestras son expuestas a una dispersión continua y en otros la dispersión es intermitente.

Otras variaciones son la composición de la solución (usada para formar la niebla) y la temperatura de la prueba . Las soluciones más comunes son :

- 1.- Agua pura
- 2.- Solución de cloruro de sodio al 3.5%, 5% y 20 %.
- 3.- Solución de cloruro de sodio acidificada a un pH determinado además de la adición de iones metálicos.

Generalmente la temperatura de la prueba está entre 35°C y 50°C <sup>( 4)</sup>. Las siguientes son las normas más usadas en la industria en lo referente a ensayos de niebla :

- ASTM B 117, DIN 50 021, JIS Z 2371 .- "Ensayos de Niebla Salina".

Esta prueba trata de simular exposiciones en ambientes marinos. La pulverización intermitente se aproxima más a la realidad de un ambiente costero. La prueba se realiza según esta norma a 35°C <sup>(2, 9, 10)</sup>.

- ASTM B287 .- "Ensayos de Niebla Salina Acética".

Esta norma fue creada para evaluar los recubrimientos de los accesorios de los automóviles que circulan por carreteras salinas en atmósferas urbanas (ácidas). Esta prueba es más severa que la anterior reduciéndose el tiempo de exposición de las muestras con respecto a la anterior norma y se realiza a 35°C. Se la recomienda para la evaluación del espesor y la calidad de las superficies cincadas, cadmiadas, recubrimientos de Ni-Cr, Cu-Ni-Cr y Aluminio <sup>(2)</sup>.

- ASTM B 368.- "Ensayos de Niebla Salina Acética más Cloruro Cúprico"

Esta prueba trata de simular las exposiciones en atmósferas urbanas e industriales, agravadas por las sales y metales pesados del fango de la carretera.; la temperatura a la que se realiza es a 49°C . Esta prueba es usada para la evaluación de recubrimientos de Ni-Cr sobre Acero y Zinc <sup>(2)</sup>.

- ASTM G 43.- "Ensayos de Niebla de Agua de Mar Sintética Acidificada"

Esta prueba es similar a la primera mencionada con la variación en la solución salina que aparte de contener cloruro de sodio, se le añade cloruro de magnesio y cierta cantidad de ácido acético. La prueba se realiza a 35°C ó 49°C <sup>(2)</sup>.

- ASTM D 2247.- "Ensayo de Humedad al 100 %"

Esta norma trata de simular exposiciones en ambientes rurales, especialmente en regiones tropicales, se realiza a 38°C <sup>(2)</sup>. Esta última prueba puede ser realizada por el equipo a diseñar realizando sólo unos pequeños cambios.

Se recomienda que el periodo de pulverización sea lo suficientemente largo como para cubrir totalmente las muestras con gotitas de la solución. Se ha comprobado que la pulverización intermitente se aproxima más a la realidad de un ambiente marino o costero que a una pulverización continua <sup>(11)</sup>.

*La Cámara de Pulverización Salina* sigue siendo un ensayo relativamente barato y fácil de realizar, y que puede dar resultados prácticos con muchos metales si se utiliza con discreción.

Al igual que acontece con la mayoría de los ensayos acelerados, es muy conveniente confirmar los resultados después por medio de ensayos de servicio o de campo, realizados en una atmósfera marina real <sup>(12)</sup>.

Años atrás se afirmaba que 100 horas en la cámara de pulverización equivalían a un año de vida del recubrimiento en un ambiente real bajo condiciones de exposición reales. Este pronóstico de vida útil del recubrimiento nunca ha sido exactamente correlacionado. Lo que si se puede afirmar con certeza es que los recubrimientos que tienen éxito en la prueba de niebla salina en periodos de 1000 a 2000 horas continuas tendrán una buena resistencia en ambientes salinos <sup>(13)</sup>.

#### 4.4 OBJETIVOS DE LOS ENSAYOS DE PULVERIZACION SALINA.

El objetivo de estas pruebas es obtener una rápida evaluación del comportamiento de los recubrimientos en ambientes específicos simulados.

Estas pruebas de por si son aceleradas debido a las condiciones de temperatura, humedad y agresividad de la solución a pulverizar.

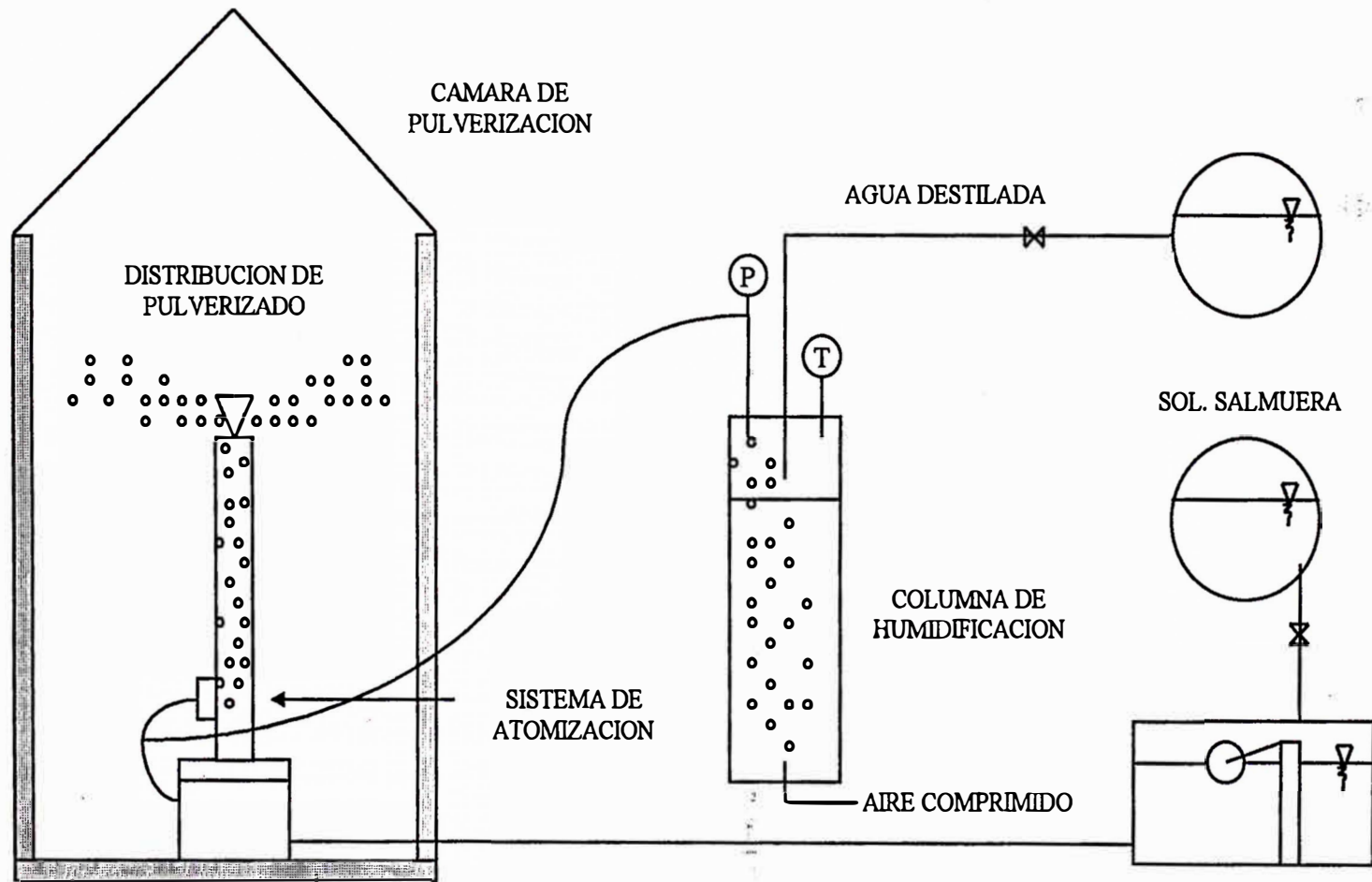
#### 4.5 COMO TRABAJA LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA.

Una vez que la cámara de pulverización alcanza su temperatura de operación, se le hace ingresar aire húmedo saturado, el cual se expande al pasar por una tobera, creando una depresión o vacío que es usado para elevar a la solución a atomizar.

La atomización de la solución creará la niebla necesaria para realizar la prueba. La niebla precipitará luego sobre las muestras pintadas y las mantendrá húmedas permanentemente.

Tiempos de prueba de exposición de las muestras múltiples de 24 horas son muy comunes; recubrimientos de alta performance son expuestos de 500 a 1000 horas en estos ambientes simulados <sup>(14)</sup>

## DIAGRAMA BASICO DE LA CAMARA DE PULVERIZACION





#### 4.6. DESCRIPCION DEL EQUIPO. PRINCIPALES PARAMETROS

##### A CONSIDERAR.

El equipo consta de las siguientes partes principales <sup>(2)</sup>

- Una cámara o cabina para la formación de niebla.
- Un tanque de la solución a atomizar (pulverizar).
- Una columna de humidificación , para saturar el aire que ingresara a la cabina.
- Un distribuidor de aire (burbujeador) localizado al fondo de la columna de humidificación, este dispositivo permitirá la dispersión del gas en forma de burbujas en el agua.
- Un sistema de atomización (toberas) para la formación de niebla.
- Un compresor para el abastecimiento de aire comprimido.

Los siguientes son los principales parámetros a considerar para realizar la prueba :

- Composición de la solución a atomizar.
- Temperatura de la cámara o cabina.
- Presión y temperatura de la columna de humidificación.
- Tiempo de duración de la prueba (continua o intermitente).

#### 4.7. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA.

Los ensayos de pulverización salina son una de las pruebas más comunes, que es usada para evaluar los recubrimientos que deben ser usados por las industrias militares, automotrices, pesqueras, y en general todo tipo de industria que requiera el uso de recubrimientos como protección contra la corrosión atmosférica (ambientes marinos, industriales, rurales, etc.) <sup>(15)</sup>.

La columna de burbujeo con que cuenta este equipo (en nuestro caso particular usado como humidificador de aire), es un dispositivo que se emplea con frecuencia en la industria química como absorbedores, fermentadores, y en general en reactores en los que se llevan a cabo reacciones gas-líquido-sólido. Pueden ser de una o varias etapas, continuos o discontinuos, y en operación en paralelo o en contracorriente <sup>(16)</sup>.

## ***CAPITULO V.- DISEÑO DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA.***

### **5.1 ANTECEDENTES DEL SISTEMA ACTUAL**

Como hemos expresado anteriormente la creciente exigencia en la calidad de los productos destinados a prevenir la corrosión, así como la alta competitividad existente entre ellas, ha hecho de que las empresas dedicadas a su fabricación tiendan a someter sus productos a todos los ensayos y test de control de calidad que indican las Normas especializadas, en sus propios laboratorios o en instituciones de reconocido prestigio.

Es en este sentido, y aunado a los fines propios de investigación, que la Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera de la U.N.I. implementó hace unos años un gabinete de pruebas en medio salino para ensayos de corrosión acelerados dentro del Area de Corrosión <sup>(17)</sup>; el cual a la fecha se encuentra en operación.

Se ha revisado, en el presente trabajo, con detalle el soporte técnico (definición de modelos matemáticos) de las ecuaciones de diseño de los diferentes componentes del sistema planteado, así como su equipamiento.

Actualmente, si bien aún es necesario hacer alguna inversión adicional, es posible efectuar una serie de corridas de acuerdo a las normas a tal punto que nos ha servido de comparación con los resultados teóricos de diseño obtenidos de cada uno de las principales equipos que lo conforman.

A continuación detallaremos las ecuaciones y cálculos realizados para el diseño de estos componentes del sistema. Toda la Bibliografía y Simbología usada, se encuentran al final del presente trabajo.

## 5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

A continuación tenemos los resultados experimentales obtenidos en las corridas de prueba realizadas en la cámara de pulverización salina existente con las modificaciones hechas por nosotros en el diseño de sus principales componentes.

Estas pruebas se realizan con la columna de humidificación prototipo y de los resultados obtenemos las dimensiones y características de la nueva columna y demás equipos propuestos; también se hace la determinación experimental del tamaño de burbuja, medición de flujos de aire y de salmuera, medición de temperatura y presión en diversos puntos, comprobación de % humedad relativa en la cabina, y medición de gastos de salmuera y recolectados de pulverizado.

a) Eficiencia de la Resistencia Eléctrica

Usada en la Columna de Humidificación prototipo, para estimar las características de la nueva resistencia a proponer (resistencia eléctrica para agua):

Columna prototipo :  $D_c = 0.19 \text{ m}$  ,  $h_c = 0.40 \text{ m}$

Potencia = 400 W

Eficiencia = 89.15 % (Ver Tabla N° 1 del Apéndice)

Tiempo calentam. prom. = 54.23 min

b) Recolectados obtenidos de Solución Pulverizada en la Cámara

Luego de diferentes tiempos de corrida (ininterrumpidas), en la cámara de pulverización, se tomaron recolectados de pulverizados en probetas graduadas, colocadas en dos puntos diferentes dentro de la cabina, Punto 1 a 54 cms. de la torre de dispersión y el Punto 2 a 20 cms. de la torre de dispersión :

@ 5 Psi = 0.330 ml/hr

@ 10 Psi = 0.382 ml/hr

@ 15 Psi = 0.430 ml/hr (Ver Tabla N° 2 del Apéndice)

Como estos colectados promedio son menores que los exigidos por la Norma JIS  $Z^{(10)}$ , se extrapola estos valores hasta conseguir el valor mínimo de 0.50 ml/hr dado en la Norma anterior, y con este resultado determinamos la Presión mínima necesaria que debe existir en la columna para alcanzar este valor.

Así obtenemos :  $\Rightarrow @ 22 \text{ Psi} = 0.50 \text{ ml/hr}$

### c) Gastos en la Columna de Humidificación

Gasto de agua por efecto de la pulverización de la solución salina, leído por descenso de nivel en la columna :

$$@ 5 \text{ Psi} = 21.72 \text{ ml/hr}$$

$$@ 10 \text{ Psi} = 23.51 \text{ ml/hr}$$

$$@ 15 \text{ Psi} = 25.10 \text{ ml/hr} \quad (\text{Ver Tabla N}^\circ 3 \text{ del Apéndice})$$

Luego obtenemos :  $\Rightarrow @ 22 \text{ Psi} = 27.33 \text{ ml/hr}$  (Valor extrapolado)

### d) Flujos promedio de aire que ingresa a la columna

Este flujo es medido con un rotámetro para aire.

$$@ 5 \text{ Psi} = 8.82 \text{ pie}^3/\text{hr}$$

$$@ 10 \text{ Psi} = 10.96 \text{ pie}^3/\text{hr}$$

$$@ 15 \text{ Psi} = 13.05 \text{ pie}^3/\text{hr} \quad (\text{Ver Tabla N}^\circ 4 \text{ del Apéndice})$$

Luego obtenemos :  $\Rightarrow @ 22 \text{ Psi} = 15.98 \text{ pie}^3/\text{hr}$  (Valor extrapolado)

### e) Consumo de Solución Pulverizada

Obtenido en base al descenso de solución salina en el tanque de salmuera, el valor para  $P = 22 \text{ Psi}$  sirve de comparación con el obtenido de ecuaciones :

@ 5 Psi – 1310.0 ml/hr

@ 10 Psi = 1610.0 ml/hr

@ 15 Psi = 1910.0 ml/hr (Ver Tabla N° 5 del Apéndice)

Luego obtenemos :  $\Rightarrow$  @ 22 Psi = 2330.0 ml/hr (Valor extrapolado)

f) Humedad relativa obtenida en la cabina @ Tamb = 20°C

Usando la diferencia de temperaturas de un sistema de termómetros de bulbo húmedo y seco, colocados en el interior de la cámara de pulverización, luego se obtuvo de tablas el valor correspondiente a esta diferencia de lecturas <sup>(8)</sup>.

$\Rightarrow$  % HR<sub>cabina</sub> = 95.30 % (Ver Tabla N° 6 del Apéndice)

Humedad del ambiente exterior promedio      80.0 % HR

g) Diámetro equivalente promedio de la burbuja en la Columna prototipo

Determinado a través de la toma de placas fotográficas a las burbujas formadas en la columna de humidificación a diferentes presiones de operación, para más detalles ver las Figuras N° 01, 02 , 03 y 04 en el Apéndice.

Columna prototipo :  $D_c = 0.19 \text{ m}$  ,  $h_c = 0.40 \text{ m}$

@ 5 Psi – 0.007418 m

@ 10 Psi – 0.006608 m

@ 15 Psi – 0.005638 m (Ver Tabla N° 7 del Apéndice)

### h) Velocidad de Ascensión de las burbujas en la Columna de Humidificación

Determinado en base a los resultados experimentales de diámetro equivalente de burbuja anteriormente encontrados, y utilizando la siguiente ecuación <sup>(18)</sup> :

$$* V_t = [ 2 \sigma / (d_b \cdot \rho_L) + g \cdot d_b / 2 ]^{1/2}$$

$$@ 5 \text{ Psi} = 0.235 \text{ m/sg}$$

$$@ 10 \text{ Psi} = 0.231 \text{ m/sg}$$

$$@ 15 \text{ Psi} = 0.229 \text{ m/sg}$$

## 5.3 DISEÑO DE LA COLUMNA DE HUMIDIFICACION

### 5.3.1 DETERMINACION DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO

A continuación, colocamos las ecuaciones matemáticas a utilizar en el diseño de la columna de humidificación :

#### a) Cálculo del Re en el orificio de entrada de aire a la columna

Se toma como ejemplo de cálculo los valores obtenidos para una corrida experimental en la columna de humidificación prototipo a 15 Psi.



Datos a considerar :

$$Q_{G_0} = 13.05 \text{ pie}^3/\text{hr} = 1.021 \text{ E-04 m}^3/\text{sg}$$

$$P = 15.0 \text{ psi} \quad (\text{presión en la columna})$$

$$d_o = 0.0115 \text{ m} \quad (\text{orificio de entrada de aire})$$

$$A_o = 1.04 \text{ E-04 m}^2$$

$$\text{Así,} \quad Re_o = \rho_o \cdot d_o \cdot V_o / \mu_G = 1454$$

Las propiedades físicas se determinan a una temperatura promedio entre el gas de entrada ( $T = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), y la salida del líquido ( $T = 46.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

b) Cálculo del Diámetro de Burbujas teórico a producirse en el orificio

Con el valor de  $Re_o$  obtenido, podemos predecir el diámetro de la burbuja en el orificio ( $d_{bo}$ ), para ello aplicamos ecuaciones que se refieren a sistemas con orificios horizontales simples como el caso de nuestro equipo <sup>(16)</sup>.

$$* d_{bo} = 0.0287 \cdot d_o^{1/2} \cdot Re_o^{1/3} \dots\dots\dots(1.1)$$

$$Re_o = \rho_o \cdot d_o \cdot V_o / \mu_G < 2100 \quad (\text{Flujo intermedio})$$

Luego tendremos,

$$\Rightarrow d_{bo} = 0.035 \text{ m}$$

*c) Velocidad de ascensión teórica para burbujas aisladas,  $V_t$*

Usamos ecuación dada por Robert Treybal <sup>(18)</sup>

$$* V_t = [ 2\sigma / (d_b \cdot \rho_L) + g \cdot d_b / 2 ]^{1/2} \dots\dots(2.2)$$

De las placas fotográficas determinamos el valor experimental del diámetro promedio de las burbujas  $d_b = 0.005638 \text{ m}$  (para  $P = 15 \text{ Psi}$ ), luego tendremos:

$$\Rightarrow V_t = 0.229 \text{ m/sg}$$

Observ. El comportamiento de grandes cantidades de burbujas agrupadas, difiere del obtenido en burbujas aisladas. Según R. Treybal, las velocidades de ascensión son menores debido al agrupamiento, el diámetro de la burbuja puede alterarse por la turbulencia del líquido, que causa que las burbujas se unan entre sí por coalescencia, formando una mucho más grande y más lenta <sup>(18)</sup>.

*d) Diseño del Distribuidor*

Existen diversos tipos de distribuidores de aire (burbujeadores). Estos pueden ser :

- 1.- Tuberías perforadas con uno o más agujeros.
- 2.- Platos perforados.
- 3.- Materiales porosos (alúmina, sílice, plástico, carbón, etc.).

De acuerdo a lo expresado R. Treybal <sup>(18)</sup>, para columnas con diámetros mayores a 0.30 m. se recomienda burbujeadores con dos o más orificios; por lo tanto para nuestro caso que el diámetro es menor ( $D_C = 0.190 \text{ m}$ ), consideraremos un burbujeador simple colocado en el fondo de la columna (tubería con un solo agujero). Estos burbujeadores tiene la ventaja de ser baratos y fácilmente desmontables para su limpieza y mantenimiento.

#### e) Determinación del Diámetro de la Columna de Humidificación

Consideramos el valor  $D_C$ , Diámetro de la columna prototipo determinada :

$$\Rightarrow \underline{D_C = 0.190 \text{ m}}$$

Nota: Para el diseño final se recomendará una columna de altura :  $h_C = 0.60 \text{ m}$ , el mismo diámetro  $D_C = 0.190 \text{ m}$ , con una resistencia eléctrica de calentamiento de 650 W y un tiempo promedio estimado de 60 min. para lograr una temperatura del líquido de 50 °C.

### 5.3.2 CALCULO DE LA ALTURA OPTIMA DE LA COLUMNA Y TIEMPO DE CONTACTO.

#### a) Analogía entre la Transferencia de Calor y de Masa

Para el desarrollo de los cálculos se ha optado por el uso de la Analogía de la Transferencia de Calor y de Masa <sup>(19, 20)</sup>. En la transferencia de calor tenemos el caso de una esfera que se sumerge violentamente en un líquido perfectamente agitado.

En la Fig. 18.9 del texto de Donald Kern <sup>(21)</sup>, se muestra la distribución de temperatura en una esfera resultante de la conducción de calor en estado no estacionario. Donde  $T_0$ , es la temperatura inicial de la esfera y  $T_1$ , es la temperatura de la superficie para  $t > 0$ .

Siendo la geometría la misma y la condición inicial y límite idénticas la analogía es aplicable. Por tal motivo se puede tomar la solución dada por D. Kern <sup>(21)</sup> y hacer los cambios necesarios en la notación para transformar la solución de transferencia de calor en una de transferencia de masa.

Así tendremos

Temperatura  $T$        $\leftrightarrow$       Concentración  $C$

Difusividad Térmica  $\alpha$   $\leftrightarrow$       Difusividad de Transferencia de masa  $D$

\* Condición inicial:

Temp. inicial de la esfera  $T_0$   $\diamond$  Concentración inicial de la esfera  $C_0$

\* Condición límite:

Temp. en superficie de la esfera  $T_s$   $\diamond$  Conc. en superficie de la esfera  $C_s$

\* Condición final:

Temp. final en la esfera  $T_f$   $\diamond$  Concentración final en la esfera  $C_f$

De acuerdo a ello, se tiene los siguientes parámetros:

$$\text{Temp. adimensional} = \frac{(T_s - T_f)}{(T_s - T_0)} \diamond \frac{(C_s - C_f)}{(C_s - C_0)} = \text{Concentración adimensional}$$

$$\text{Curva : } \frac{\alpha \cdot t}{R^2} \diamond \frac{D \cdot t}{R^2} \quad \text{Tiempo adimensional}$$

$$\text{Abcisa : } r/R \quad \text{Coordenada radial adimensional}$$

*Condiciones iniciales del aire de entrada :*

$$\text{Temperatura, } ^\circ \text{C} = 20.0$$

$$\% \text{ HR} = 80.0$$

*Condiciones finales del aire de salida :*

$$\text{Temperatura, } ^\circ \text{C} = 46.0$$

$$\% \text{ HR} = 98.0$$

b) Cálculo de la Presión de Saturación de vapor de agua

De la Ecuación de Antoine <sup>(8)</sup> tenemos :

$$\text{Log } P_v \text{ sat} = 8.10765 - \frac{1750.286}{T + 235}$$

$$\text{Luego : } P_v \text{ sat} = 10^{\frac{(8.10765 - 1750.286)}{T + 235}} \text{ mm Hg}$$

$$\text{Como : } \%HR = 100 \cdot P_v / P_v \text{ sat}$$

$$\text{Entonces : } P_v = \%HR \cdot P_v \text{ sat} / 100 \text{ mmHg}$$

c) Cálculo de la Concentración en la burbuja

De la ecuación anterior tenemos :

$$C_{\text{burbuja}} = P_v / (R \cdot T) \text{ Kmol/m}^3$$

De todo lo anterior, obtenemos la siguiente tabla para las condiciones especificadas :

Condición del aire húmedo	Temperatura (°C)	% HR	Presión de Vapor, (mmHg)	Conc. Vapor en la burbuja (Kmol/m <sup>3</sup> )
Inicio, o	20.0	80.0	14.0	0.00077
Final, f	46.0	98.0	74.0	0.00372
Saturación, s	46.0	100.0	75.5	0.00379

d) Estimación del tiempo en que la burbuja alcanza la Concentración Final

$C_f$  (98% HR)

Hallamos la ordenada de la Fig. 11.1-3 del texto de D. Kern<sup>(21)</sup>:

$$\text{Concentración adimensional } \frac{(C_s - C_f)}{(C_s - C_0)} = 0.023$$

Como la coordenada radial,  $r/R = 0$  la curva que se aproxima es cuando :

$$\text{Tiempo adimensional } 4 \frac{D_G \cdot t_f}{d_b^2} = 0.45, \text{ Para : } d_b = 0.006608 \text{ m (P = 10 Psi)}$$

Por lo tanto, despejando  $t_f$  se tiene :

$$\Rightarrow t_f = 0.41 \text{ seg.}$$

Del resultado obtenido, así como del criterio de que las burbujas pequeñas se saturan al instante, inferimos de que la altura de la columna no es un parámetro a considerar<sup>(10)</sup>.

Las burbujas que tengan menor tamaño ( $d_b < 6.608 \text{ mm}$ ), se saturarán mucho más rápido y a una altura menor; se debe tener en cuenta que para el cálculo efectuado

se hizo la analogía masa-calor, considerando esferas sólidas que son calentadas bruscamente

Para el caso nuestro, los resultados serán aun mas pequeños en razón de que la burbujas no permanecen inmóviles como en la analogía, sino que ascienden teniendo contacto con líquido nuevo a cada instante <sup>(22)</sup>.

### 5.3.3 CALCULO DEL DIAMETRO DE BURBUJA PARA QUE SE LOGRE 98% H.R. EN LA COLUMNA

Para el cálculo del diámetro de burbuja,  $d_B$ , para lograr un 98% HR, consideramos como altura mínima de agua en la columna, la longitud de la resistencia eléctrica sumergida en la columna de humidificación; debido a que una menor altura de agua quemaría la resistencia.

$$h_{\min} - h_{\text{resistencia}} = 0.25 \text{ m}$$

Hallamos la Velocidad de Ascensión  $V_t$

$$V_t = [ 2\sigma / (d_B \cdot \rho_L) + g \cdot d_B / 2 ]^{1/2} = [ 0.000142 / d_B + 4.9 d_B ]^{1/2}$$



De los cálculos anteriores tenemos que

$$\text{Tiempo adimensional} \quad 4 \underline{D_G \cdot t} = 0.45$$

Por lo tanto, despejando t se tiene

$$\Rightarrow t = 7031.2 d_B^2 \text{ seg}$$

$$\text{Como :} \quad H - h_{\min} = V_t \cdot t = 0.25$$

Resolviendo la ecuación de grado 5 generada al reemplazar los valores de  $V_t$  y t en función de  $d_B$ , tendremos que

$$V_t = 0.26 \text{ m/sg} \quad \Rightarrow \underline{d_B = 0.012 \text{ m}}$$

$$t = 1.01 \text{ seg}$$

Esto nos indica que aquellas burbujas con un diámetro máximo de 0.012 m alcanzarán los 98% HR a una altura de líquido igual al de la resistencia ( $h = 0.25$  m), todas las burbujas menores a este diámetro requerirán de menor altura para alcanzar la misma humedad.

### 5.3.4 CALCULO DEL DIAMETRO DE BURBUJA REQUERIDO PARA QUE ESTA ALCANCE LA TEMPERATURA DEL LIQUIDO

Determinamos las condiciones del sistema :

$$\text{Altura líquido : } h = 0.25 \text{ m}$$

$$\text{Temp. inicio : } T_0 = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. final : } T_f = 46.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Temp. superf. burbuja : } T_s = 50.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{La temperatura adimensional será : } \frac{T_s - T_f}{T_s - T_0} = 0.133$$

De la Fig.18.9 del texto de D. Kern<sup>(21)</sup>, obtenemos que para 0.133 :

$$4 \alpha \cdot t / d_B^2 = 0.27 \quad \text{Donde } \alpha : \text{ difusividad térmica} = 1.38 \text{ E-05 m}^2/\text{s}$$

$$\text{Luego : } t = 4891.3 d_B^2$$

$$\text{Como : } V_t = [0.000142 / d_B + 4.9 d_B]^{0.5}$$

$$\text{y } H = V_t \cdot t$$

Tabulamos los valores de  $V_t$ ,  $t$  y  $d_B$ , obtenidos para el valor de  $H$  dado :

H (m)	$d_B$ (m)	$V_t$ (m/sg)	t (sg)
0.250	0.0135	0.28	0.89

Observando ambos casos se concluye que la altura de la columna de agua estará definida por las condiciones de concentración (98% HR), y no por la temperatura que se desea alcanzar en la columna de humidificación.

En nuestro caso siendo la columna calentada por una resistencia de inmersión colocada verticalmente en el fondo de la columna (Ver Figura N° 04), la altura de esta resistencia ( $h = 25$  cm), será el limitante en cuanto a la altura de líquido que tendrá la columna.

### 5.3.5 CALCULO DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL AGUA DE LA COLUMNA.

Para tal efecto, usamos un Calentador de Inmersión <sup>(15)</sup>.

Datòs necesarios :

Altura del líquido = 0.58 m

Diámetro de la columna = 0.19 m

Temperatura inicial = 20.0 °C

Temperatura final = 49.0 °C

Cp agua = 4187 J / Kg.°C

tiempo de calentamiento,  $t_c$  = 60.0 min.

Cálculo de la masa de agua :

$$\Rightarrow m_{\text{agua}} = \pi \cdot D_c^2 \cdot h_c \cdot \rho / 4 = 17.012 \text{ Kg}$$

Balance de energía : Calor desprendido por la resistencia eléctrica = Calor ganado por el agua

$$Q_{re} = m_{\text{agua}} \cdot C_p \cdot (T_f - T_o) / t_c = 573.78 \text{ W}$$

Considerando una eficiencia de la resistencia eléctrica de 89.15 % (valor obtenido experimentalmente de las pruebas realizadas a una resistencia de inmersión comprada localmente, ver Tabla N °1 en el apéndice), seleccionamos una resistencia con la siguiente potencia :

$$\Rightarrow \text{Pot. Resistencia} = 643.614 \text{ W} \approx 650 \text{ W}$$

### 5.3.6 PREDICCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS GOTITAS PRODUCIDAS POR LA TOBERA EN LA CAMARA

Para el cálculo del tamaño teórico de las gotitas formadas por efecto de la pulverización de la solución salina, usaremos la Ecuación de "Diámetro Medio de

Sauter", del texto de J. Perry - C. Chilton <sup>(8)</sup>, debemos constar que para un mejor acercamiento del resultado a lo real usamos las condiciones de operación de las corridas hechas en el sistema actual. La ecuación en mención (en unidades SI), está dada por :

$$* D_{32} = \frac{585.2}{v} \left( \frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 1.68 \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma^{0.5} \cdot \rho_L^{0.5}} \right)^{0.45} \left( \frac{1000 L \cdot \rho_G}{G \rho_L} \right)^{1.5} \right]$$

$$* D_{max} \approx 3.1 D_{32} \quad \text{Partícula de mayor tamaño en la población.}$$

$$* D_{max} \approx 2.5 D_{vm} \quad \text{Mediana de volumen.}$$

Donde :

$$D_{32} = \text{Diámetro medio de Sauter, mm}$$

$$v = \text{Velocidad relativa} = 443.90 \text{ m/sg}$$

$$L, G = (2330.0 \text{ ml/hr}), (15.98 \text{ pie}^3/\text{hr})$$

$$L/G : \text{relación en masa} = (0.000647 \text{ Kg/s}) / (0.000151 \text{ Kg/s}) = 4.28$$

$$\rho_L, \sigma, \rho_G, \mu = \text{Propiedades de los fluidos en unidades SI}$$

Reemplazando valores obtenemos :

$$\Rightarrow \underline{D_{32} = 0.346 \text{ mm}} \quad \text{y} \quad \Rightarrow D_{max} = 1.073 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow D_{vm} = 0.429 \text{ mm}$$

## 5.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES DE SALMUERA

### *A) Tanque Externo de mayor capacidad .*

Se recomienda tener un abastecimiento de la solución a atomizar de por lo menos 48 hrs. continuas de prueba. Considerando un gasto promedio de 2330.0 ml/hr, calculamos :

$$\text{Consumo total en 48 hrs.} = 0.112 \text{ m}^3$$

Por tanto, escogemos un tanque de las siguientes características :

$$D_{tk} = 0.42 \text{ m}$$

$$h_{tk} = 0.82 \text{ m}$$

$$V_{tk} = 0.114 \text{ m}^3$$

### *B) Tanque Externo de menor capacidad .*

El tanque externo mayor (seleccionado anteriormente), alimentará de solución salina a este tanque de menor capacidad mediante un sistema de control de nivel de "tipo boya".

Este tanque menor debe mantener el mismo nivel que posee el tanque interior de salmuera ubicado debajo de la torre de dispersión de la cámara de pulverización.

De esta forma la adición de salmuera será controlada en forma automática y el nivel en el tanque interno permanecerá invariable.

Para ello, seleccionamos un tanque de las siguientes características :

$$D_{tk} = 0.40 \text{ m}$$

$$h_{tk} = 0.30 \text{ m}$$

$$V_{tk} = 0.038 \text{ m}^3$$

Estas medidas están condicionadas por el tamaño del mecanismo de control a instalarse en el interior del tanque. Para mas detalles se puede ver el diagrama ubicado en el Apéndice (Plano N° 05).

## 5.5 DISEÑO DE LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA.

### 5.5.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA CAMARA DE PULVERIZACION SALINA.

La cámara de pulverización salina debe tener una capacidad tal que se pueda trabajar con ella con facilidad y comodidad, y a la vez debe tener el volumen mínimo requerido por Norma para efectuar las pruebas.

Se debe evitar en lo posible el aglomeramiento entre sus partes internas y las muestras a colocar. Para evitar estas dificultades se recomienda cámaras con capacidades mayores a  $0.43 \text{ m}^3$  <sup>(2, 10, 11)</sup>. En nuestro caso la cabina tendrá un volumen de  $0.615 \text{ m}^3$ , esta capacidad seleccionada es mayor al de la cabina actual en la que se hicieron las pruebas para el presente trabajo ( $V = 0.572 \text{ m}^3$ ) <sup>(16)</sup>

### 5.5.2 SELECCIÓN DE LA TOBERA ATOMIZADORA

Para conseguir pulverizar la solución se utilizan diferentes dispositivos atomizadores (toberas de dos fluidos), la característica común de este tipo de atomizadores es la dependencia con la alta velocidad relativa del gas (aire en nuestro caso), para proporcionar la energía de atomización <sup>(8)</sup>.

La selección de la tobera adecuada se hizo por razones de costo y fácil mantenimiento de estos dispositivos. Los de diseño mas simple y económicos son los fabricados de goma dura, vidrio o plástico, los cuales constan de dos tubos para la entrada de aire y de la solución a pulverizar. Es por este criterio que se escoge la tobera usando uno de estos materiales.

Toberas de mayor costo y de diseño mas complejo, son fabricadas en metal y otras aleaciones, dependiendo de las características de los fluidos que van ser pulverizados. Los tamaños de partículas producidos por estos dispositivos no



difieren de los anteriores, pero existe el inconveniente de que pueden contaminar la solución a pulverizar si es que ésta es corrosiva, como lo es en nuestro caso.

### 5.5.2.1 ESTIMACION DE LA PRESION PRODUCIDA A LA SALIDA DE LA TOBERA (VACIO)

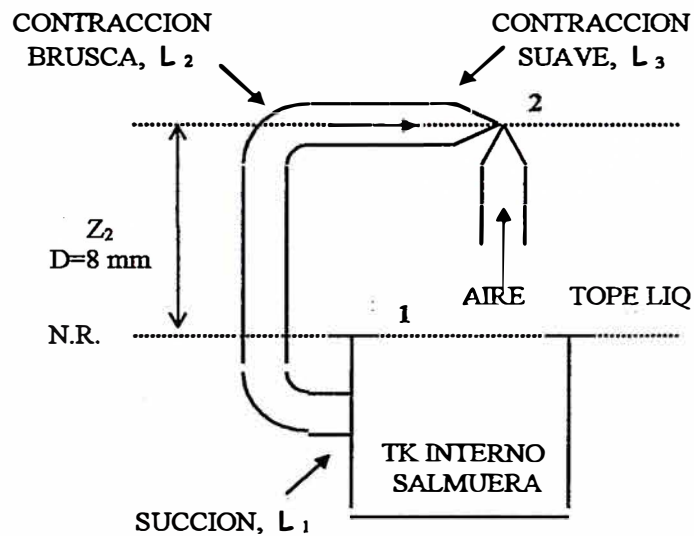


DIAGRAMA DEL SISTEMA DE ATOMIZADO

\* Balance de Energía mecánica en el sistema mostrado <sup>(23)</sup> :

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - H_f = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Como :  $P_1 = 0$  (P. Atm.)

$V_1 \approx 0$  (solución casi estanco)

$Z_1 = 0$  (nivel de referencia)

$$H_f = \Sigma \text{p\u00e9rdidas} = (L_1 + L_2 + L_3 + \lambda \cdot L/D) \cdot V^2/2g$$

\* Reemplazando :

$$\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_f = 0 \dots\dots(1)$$

\* Para el c\u00e1lculo de la Presi\u00f3n  $P_2$ , tenemos los siguientes valores de las variables involucradas, asumimos de las corridas experimentales  $q = 2330.0 \text{ ml/hr}$  :

$$L_1 = 0.19 \text{ (succi\u00f3n)}$$

$$L_2 = 0.27$$

$$L_3 = 0.20$$

$$L = 0.30 \text{ m}$$

$$Z_2 = 0.09 \text{ m}$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = 0.66$$

$$Re = 103.2 \text{ (laminar)}$$

$$\lambda = 64/Re = 0.62$$

$$V = q/A = 0.0129 \text{ m/sg}$$

$$\text{Con ello : } \Rightarrow H_f = 0.0002 \text{ m}$$

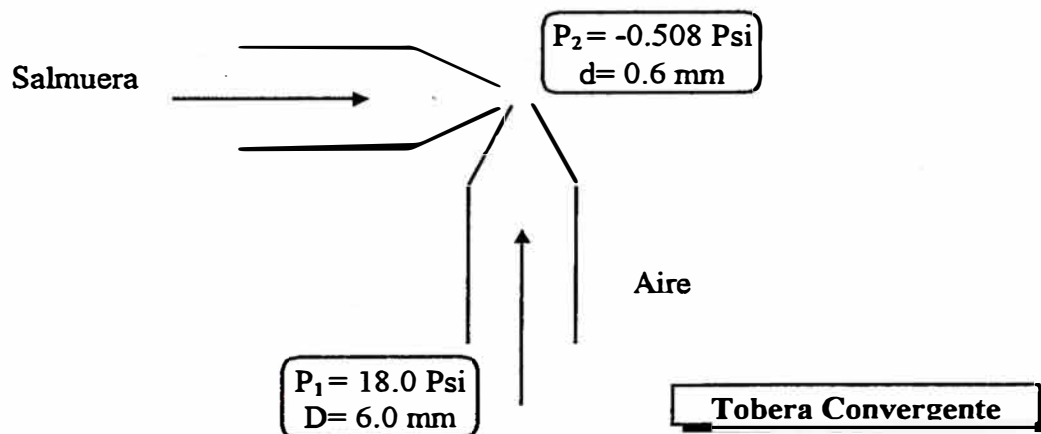
$$V_2 = q/A_2 = 2.29 \text{ m/sg}$$

\* Finalmente con los valores anteriores, podemos calcular el valor de la presi\u00f3n producida a la salida de la tobera,  $P_2$  :

$$\Rightarrow \underline{P_2 = -3500.56 \text{ N/m}^2 = -0.508 \text{ Psi (Presi\u00f3n vac\u00edo)}}$$

### 5.5.2.2 CALCULOS EFECTUADOS EN LA SELECCIÓN DE LA TOBERA CONVERGENTE

La selección de la tobera de dos fluidos estará determinada principalmente de los datos de presión y el flujo a descargar por ella. Asimismo, será necesario tener como dato del fabricante el coeficiente de descarga del equipo. Se considera 22 Psi a la salida de la columna de humidificación y una pérdida de 4 Psi en el trayecto a la tobera.



a) Para el Aire :

La ASME , recomienda la siguiente ecuación para el cálculo del caudal de descarga de una tobera para cualquier gas <sup>(23)</sup>.

$$q_1 = C_1 \cdot \varepsilon \cdot A_2 \cdot Y \cdot [2(P_1 - P_2) / \rho_1]^{0.5}$$

$$Y = \frac{[(\gamma \cdot r^{2/\gamma}) \cdot (1 - r^{1-1/\gamma})(1 - \delta^4)]^{0.5}}{[(1 - \delta^4 \cdot r^{2/\gamma})(1 - r)(\gamma - 1)]^{0.5}}$$

Donde :  $C_1 =$  Coeficiente de descarga = 0.90 (asumido)

$$\varepsilon = [(1 - \delta^4)]^{-0.5} \approx 1.0$$

$$\delta = d / D = \text{diam. menor / diam. mayor tobera} = 0.10$$

$Y =$  Coef. expansión isoentrópica (para líquidos es 1.0)

$$\gamma = \text{relación } C_p / C_v = 1.4$$

$$r = \text{relación } P_2 / P_1,$$

$$\rho_1 = \text{densidad del aire} \approx 2.54 \text{ kg/m}^3$$

$$A_2 = \text{área del orificio de salida de la tobera}$$

Reemplazando valores obtenemos :

$$\Rightarrow Y = 0.64$$

Finalmente :

$$\Rightarrow \underline{q_1 = 5.13 \text{ E-05 m}^3/\text{s} = 6.53 \text{ pie}^3/\text{hr}}$$

*b) Para la solución a atomizar :*

Al igual que en el caso anterior se aplica la siguiente ecuación <sup>(23)</sup>.

$$q_2 = C_2 \cdot \varepsilon \cdot A_2 \cdot [2(P_1 - P_2) / \rho_L]^{0.5}$$

Donde :  $C_2 =$  Coeficiente de descarga = 0.90

$$\varepsilon = [(1 - \delta^4)]^{-0.5} \approx 1.0$$

$$\delta = d / D = \text{diam. menor / diam. mayor tobera} = 0.10$$

$$\rho_L = \text{densidad del líquido} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$A_2 = \text{área del orificio de la tobera}$$

Reemplazando valores obtenemos :

$$\Rightarrow \underline{q_2 = 6.739 \text{ E-07 m}^3/\text{s} = 2426.14 \text{ ml/hr}}$$

Para cumplir con las condiciones exigidas por la Norma JIS Z <sup>(10)</sup>, que precisan obtener un valor mínimo de 0.50 ml/hr de recolectado para un área de exposición de 80.0 cm<sup>2</sup>, se ha determinado que la presión de operación tiene que ser de 22 Psi en la columna de humidificación. Luego el flujo de solución a atomizar será :

$$@ 10 \text{ Psi} - 1610.0 \text{ ml/hr}$$

$$@ 15 \text{ Psi} - 1910.0 \text{ ml/hr}$$

Luego obtenemos :  $\Rightarrow @ 22 \text{ Psi} = 2330.0 \text{ ml/hr}$  (Valor extrapolado)

Esto nos indica que a P = 22 Psi, se obtendría un atomizado equivalente al 96.04 % del estimado en la ecuación anterior, esto considerando un coeficiente de

descarga para la tobera de  $C_2 = 0.90$  . Si ajustamos el coeficiente de acuerdo al flujo estimado a 22 Psi, el valor real de operación será :

$$\Rightarrow C_2 = 0.864 \text{ (@ 22 Psi)}$$

### 5.5.3 SISTEMA DE DISPERSION. LOCALIZACION.

Luego de producirse la pulverización de la solución, ésta debe dispersarse lo más uniforme por toda la cabina. Para tal efecto se utilizan dos dispositivos <sup>(17)</sup> :

- a) Una placa deflectora, sobre la cual impactará la solución a pulverizar.
- b) Una torre de dispersión, dispuesta después de la tobera, al final de la misma existe un cono el cual dispersa el pulverizado por la cámara.

La elección de cualquiera de estos tipos es por razones de espacio y comodidad. Generalmente, cuando se tenga un gran número de muestras o placas de muestras grandes, tal que se dificulte la colocación de la torre de dispersión, se optará por el uso de una placa deflectora, en caso contrario como el nuestro sólo se usa la torre de dispersión ubicada en el centro de la cabina <sup>(24)</sup>.

La localización de estos dispositivos será de tal modo que ambos produzcan una niebla homogénea y cumplan con los requisitos de las Normas ASTM <sup>(2)</sup>

En forma práctica se ha encontrado que trabajando con sólo un sistema de dispersión de los dos indicados se consigue una homogeneización aceptable de la niebla salina.

#### 5.5.4 POSICION DE LAS MUESTRAS EN LA CABINA.

El *ángulo de inclinación* de las muestras es muy importante al momento de realizar la prueba, se descarta colocar las muestras horizontalmente debido al mayor espacio ocupado y por presentar una corrosión menos severa que las muestras colocadas verticalmente.

A su vez las muestras colocadas verticalmente muestran un menor grado de corrosión que aquellas colocadas con un determinado ángulo de inclinación, las diversas Normas ASTM <sup>(2)</sup> recomiendan ángulos de 15°, 30° y 45° respecto a la vertical.

Según L. Sheir : " La máxima corrosión ocurre entre los ángulos 30° y 80° respecto a la horizontal, y que exposiciones verticales dan resultados erráticos"<sup>(25)</sup>.

#### 5.5.5 SOLUCION SALINA DE PULVERIZACION

Esta es una solución de Cloruro de Sodio (NaCl), en concentraciones que oscilan entre el 3% y 20%. En la actualidad ha comenzado a usarse soluciones de 5%.

Sin embargo, también son usadas soluciones artificiales de agua de mar (ASTM G43).

Se debe tener en cuenta que soluciones como las mencionadas pueden no actuar de la misma forma que soluciones encontradas en la práctica, las cuales pueden contener impurezas que tendrán efectos adicionales en la corrosión de la muestra.

La evidencia indica que la concentración de sal no es una variable importante, no obstante ello, para algunos metales una solución al 20% de NaCl es muy corrosiva.

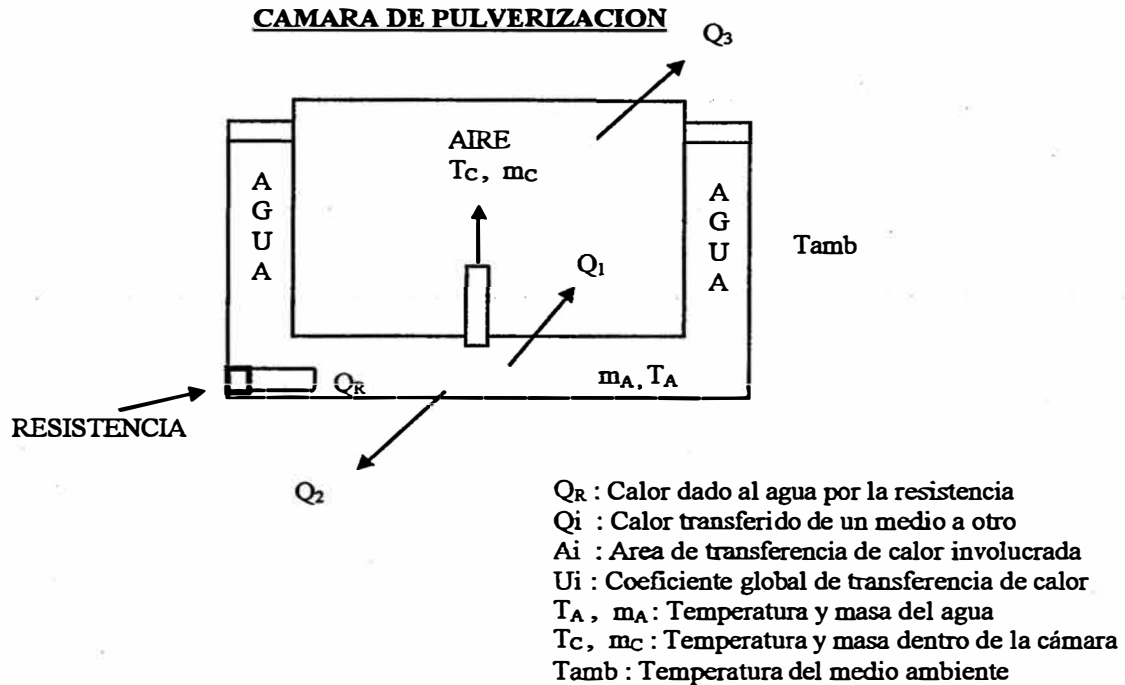
Una objeción para el uso de soluciones salinas de alta concentración es la gran tendencia a la obstrucción de la toberas, lo que impide una buena pulverización.

#### 5.5.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCION DE LA CABINA.

##### 5.5.6.1 CALCULO USANDO UNA CHAQUETA DE AGUA

En este caso se usará una chaqueta de agua como medio calefactor, calentando las paredes internas y el fondo de la cámara <sup>(15,22)</sup>. El agua se calentará por medio de una resistencia eléctrica de potencia conocida.





### A.- ESTADO NO ESTACIONARIO

\* Determinamos las siguientes relaciones de calor en la cámara y su entorno :

$$Q_1 = A_1 \cdot U_1 \cdot (T_A - T_C)$$

$$Q_2 = A_2 \cdot U_2 \cdot (T_A - T_{amb})$$

$$Q_3 = A_3 \cdot U_3 \cdot (T_C - T_{amb})$$

\* Balance de Energía en la chaqueta de agua :

$$Q_R - Q_1 - Q_2 = m_A \cdot C_{pA} \cdot dT_A / dt$$

$$Q_R - A_1 \cdot U_1 \cdot (T_A - T_C) - A_2 \cdot U_2 \cdot (T_A - T_{amb}) = m_A \cdot C_{pA} \cdot dT_A / dt$$

Despejando la diferencial y agrupando según temperaturas :

$$\frac{Q_R}{m_A C_{pA}} - \frac{(A_1 U_1 + A_2 U_2) \cdot T_A}{m_A C_{pA}} + \frac{A_1 U_1}{m_A C_{pA}} \cdot T_C + \frac{A_2 U_2}{m_A C_{pA}} \cdot T_{amb} = \frac{dT_A}{dt}$$

Hacemos el siguiente cambio de variables :

$$A = \frac{(A_1 U_1 + A_2 U_2)}{m_A C_{pA}} , \quad B = \frac{A_1 U_1}{m_A C_{pA}} \quad \text{y} \quad C = \frac{(Q_R - A_2 U_2 \cdot T_{amb})}{m_A C_{pA}}$$

Por lo tanto tendremos :

$$C - A \cdot T_A + B \cdot T_C = dT_A / dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

\* Balance de Energía en la cámara de pulverización :

$$Q_1 - Q_3 = m_C \cdot C_{vC} \cdot dT_C / dt$$

$$A_1 \cdot U_1 \cdot (T_A - T_C) - A_3 \cdot U_3 \cdot (T_C - T_{amb}) = m_C \cdot C_{vC} \cdot dT_C / dt$$

Despejando la diferencial y agrupando según temperaturas :

$$\frac{A_1 \cdot U_1}{m_C \cdot C_{vC}} \cdot T_A - \frac{(A_1 \cdot U_1 + A_3 \cdot U_3) T_C}{m_C \cdot C_{vC}} + \frac{A_3 \cdot U_3}{m_C \cdot C_{vC}} \cdot T_{amb} = \frac{dT_C}{dt}$$

Hacemos el siguiente cambio de variables :

$$D = \frac{A_1 U_1}{m_C C_{vC}} , \quad E = \frac{A_1 U_1 + A_3 \cdot U_3}{m_C C_{vC}} \quad \text{y} \quad F = \frac{A_3 \cdot U_3 \cdot T_{amb}}{m_C C_{vC}}$$

Por lo tanto tendremos :

$$D \cdot T_A - E \cdot T_C + F = dT_C / dt \dots\dots\dots (2)$$

\* Despejando la variable  $T_A$  de la ecuación (2), y lo reemplazamos en la primera ecuación, obtenemos la siguiente Ecuación Diferencial de 2° orden :

$$\frac{d^2 T_C}{dt^2} + (E + A) \frac{dT_C}{dt} + (EA - BD)T_C - (AF + CD) = 0 \dots\dots\dots(3)$$

De la solución de esta ecuación diferencial <sup>(26)</sup>, obtenemos los valores de  $T_A$  y  $T_C$  preliminares:

$$T_C = C_1 \cdot e^{x_1 t} + C_2 \cdot e^{x_2 t} + \frac{(AF + CD)}{(EA - BD)} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_A = C_1 \cdot e^{x_1 t} \cdot (x_1 + E) + C_2 \cdot e^{x_2 t} \cdot (x_2 + E) + \frac{(BF + CE)}{(EA - BD)} \dots\dots\dots (5)$$

Donde  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $x_1$  y  $x_2$  son constantes reales y diferentes que se extraen de la solución de la Ec. Diferencial, considerando como condición límite que :

$$\text{Para un } t=0 \Rightarrow T_C = T_{C_0} \quad \text{y} \quad T_A = T_{A_0}$$

Tendremos :

$$x_1 = \frac{1}{2} \cdot [ -(E + A) + \{(E + A)^2 - 4(EA - BD)\}^{\frac{1}{2}} ]$$

$$x_2 = \frac{1}{2} \cdot [ -(E + A) - \{(E + A)^2 - 4(EA - BD)\}^{\frac{1}{2}} ]$$

$$C_1 = T_{Co} - \frac{(AF + CD)}{(EA - BD)} - C_2$$

$$C_2 = \frac{D T_{Ao}}{(x_2 - x_1)} - \frac{(x_1 + E)}{(x_2 - x_1)} \left[ T_{Co} - \frac{(AF + CD)}{(EA - BD)} \right] - \frac{(DBF + CED)}{(EA - BD)}$$

Para el cálculo de las constantes involucradas en las ecuaciones anteriores, consideramos los valores siguientes que son fijos para el sistema, así como los valores de  $U_i$  que son hallados considerando condiciones de estado estacionario :

$$U_1 = 2.88 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad A_1 = 2.89 \text{ m}^2 \quad T_{Ao} = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_2 = 0.68 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad A_2 = 4.02 \text{ m}^2 \quad T_{Co} = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_3 = 1.40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad A_3 = 1.48 \text{ m}^2 \quad T_{amb} = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m_A = 78.0 \text{ Kg} \quad m_C = 0.74 \text{ Kg} \quad Q_R = 1500 \text{ W}$$

$$C_{pA} = 4187 \text{ J / Kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad C_{vC} = 714 \text{ J / Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

De esta forma obtenemos :

$$\Rightarrow T_C = -274.71 e^{-3.14E-05 t} + 0.1826 e^{-0.01969 t} + 294.89$$

$$\Rightarrow T_A = -342.85 e^{-3.14E-05 t} - 0.4563 e^{-0.01969 t} + 363.30$$

Si tabulamos valores para la diferencia de temperaturas entre la chaqueta de agua ( $T_A$ ), y la cámara ( $T_C$ ), según un tiempo de calentamiento  $t$  fijado, tendremos :

Tiempo $t$ (hrs.)*	$T_C$ (°C)	$T_A$ (°C)
0.00	20.00	20.00
1.00	33.10	36.60
1.25	36.20	40.50
2.36	49.70	57.30

\* Para efectos reales de operación se puede considerar un factor de seguridad de 1.15 a estos tiempos

## **B.- ESTADO ESTACIONARIO**

### **b.1) Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor - $U_1$**

#### **1.- Considerando Convección Natural (Lado Agua)**

Ecuaciones a usar <sup>(27)</sup>:

Notación :

$$Nu = \zeta \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad \dots\dots\dots Ec.01$$

$Gr, Pr$  : números de Grashof y Prandtl

$\nu$  : viscosidad cinemática

$$Nu = h \cdot L_R / \kappa \quad \dots\dots\dots Ec.02$$

$\mu$  : viscosidad dinámica

$$Nu = h \cdot D_R / \kappa \quad \dots\dots\dots Ec.02a$$

$D_R$  : diámetro de la resistencia

$\beta$  : coeficiente de expansión del agua

$$Gr = g \cdot \beta (T_w - T) \cdot L^3 / \nu^2 \dots Ec.03$$

$L_R$  : longitud de la resistencia

$$Gr = g \cdot \beta (T_w - T) \cdot D^3 / \nu^2 \dots Ec.03a$$

$T$  : temperatura del líquido

$T_w$  : temp. de la pared de la resistencia.

$$Pr = C_p \cdot \mu / \kappa \dots \dots Ec.04$$

Valores de las variables para realizar los cálculos

$T_w =$	55.0	°C
$T =$	45.0	°C
$g =$	9.82	m/sg <sup>2</sup>
$\beta =$	4.3E-04	°C <sup>-1</sup>
$\nu =$	5.8 E-07	m <sup>2</sup> /sg
$L_R =$	0.40	m
$D_R =$	0.008	m
$Pr =$	4.00	
$\kappa =$	0.644	W/m°K

### ***1.- Resistencia colocada verticalmente:***

Todas las propiedades del agua se evalúan a  $(T_w + T) / 2 = 50.0$  °C

Reemplazando valores en Ec.03, para determinar el Número de Grashof,  $Gr$  :

$$\Rightarrow Gr = 8.033 E+09$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 3.21 \text{ E}+10 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Usando la tabla 10.2 del texto de N. Ozisik <sup>(27)</sup> determinamos las constantes de la Ec.01 :

$$\Rightarrow C = 0.10 \quad n = 0.33$$

Reemplazando en la Ec.01, obtenemos el Número de Nusselt, Nu :

$$\Rightarrow Nu = 315.258$$

Finalmente, en la Ec.02 reemplazamos el valor de Nu para hallar el coeficiente de transferencia de calor h :

$$\Rightarrow \underline{h = 507.565 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

## ***2.- Resistencia colocada horizontalmente :***

Todas las propiedades del agua se evalúan a  $(T_w + T) / 2 = 50.0 \text{ °C}$

Reemplazando valores en Ec.03a, para determinar el Número de Grashof, Gr :

$$\Rightarrow Gr = 6.413 \text{ E}+04$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 2.283 \text{ E}+05 \quad \text{Flujo laminar}$$

Usando la tabla 10.2 del texto de N. Ozisik <sup>(27)</sup>, determinamos las constantes de la Ec.01 :

$$\Rightarrow C = 0.53 \quad \wedge \quad n = 0.25$$

Reemplazando en la Ec.01, obtenemos el Número de Nusselt, Nu :

$$\Rightarrow Nu = 11.6$$

Finalmente, en la Ec.02a reemplazamos el valor de Nu para hallar el coeficiente de transferencia de calor h :

$$\Rightarrow \underline{h = 933.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

*Por lo tanto* : De ambos resultados escogemos el valor mas alto de coeficiente de Transferencia encontrado, es decir :

$$\Rightarrow \underline{h_o = 933.80 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

## **2.- Considerando Convección Natural (Lado Aire)**

Ecuaciones a usar <sup>(27)</sup> :

$$h = 1.42 [ (T - T_w) / L ]^{0.25} \dots\dots \text{Ec.05}$$

$$h = 1.52 [ (T - T_w) ]^{0.33} \dots\dots\dots \text{Ec.05a}$$



$$Gr = g \cdot \beta (T_w - T) \cdot L_0^3 / \nu^2 \dots\dots Ec.06$$

$$Gr = g \cdot \beta (T_w - T) \cdot L_{prom}^3 / \nu^2 \dots Ec.06a$$

Valores de los parámetros para realizar los cálculos

$T_w =$	44.0	°C
$T =$	35.0	°C
$g =$	9.82	m/sg <sup>2</sup>
$\beta =$	3.3E-03	°C <sup>-1</sup>
$\nu =$	1.6E-05	m <sup>2</sup> /sg
$L_0 =$	0.62	m
$L_1 =$	1.20	m
$L_2 =$	0.85	m
$L_{prom} =$	1.02	m
$Pr =$	0.70	

**1.- Placa vertical :**

Todas las propiedades del aire se evalúan a  $(T_w + T) / 2 = 39.5 \text{ °C}$

Reemplazando valores en Ec.06, para determinar el Número de Grashof, Gr :

$$\Rightarrow Gr = 2.71 \text{ E}+08$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 1.89 E+08 \quad \text{Flujo laminar}$$

Finalmente, de la Ec.05 hallamos el coeficiente de transferencia de calor  $h$  :

$$\Rightarrow \underline{h = 2.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

## **2.- Placa horizontal :**

Todas las propiedades del aire se evalúan a  $(T_w + T) / 2 = 39.5 \text{ °C}$

Reemplazando valores en Ec.06a, para determinar el Número de Grashof,  $Gr$  :

$$\Rightarrow Gr = 1.206 E+09$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 8.446 E+08 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Finalmente, de la Ec.05a hallamos el coeficiente de transferencia de calor  $h$  :

$$\Rightarrow \underline{h = 3.16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

*Por lo tanto* : De ambos resultados escogemos el valor mas alto de coeficiente de

Transferencia encontrado, es decir :

$$\Rightarrow \underline{h_i = 3.16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### **3.- Cálculo del Coeficiente Global, $U_1$**

De la ecuación general

$$\bullet \quad \frac{1}{U_1} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} + \frac{x}{\kappa} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.07}$$

Donde :

$h_o$  : Coeficiente de transferencia del lado agua

$h_i$  : Coeficiente de transferencia del lado aire

$\kappa$  : Conductividad térmica de la pared (acrílico) <sup>(8)</sup> = 0.200 W/m.°C

$x$  : Espesor de la pared (1/4") = 0.006 m

Reemplazando valores obtenidos en Ec.07, tendremos :

$$\Rightarrow \underline{U_1 = 2.88 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### **b.2) Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor - $U_2$**

Este Coeficiente Global  $U_2$ , pertenece a la transferencia de calor (pérdidas), entre la pared del fondo de la cámara de pulverización y el medio ambiente, la Ecuación General para este caso será :

$$\bullet \quad \frac{1}{A_2 U_2} = \frac{1}{A_o h_o} + \frac{1}{A_{m-a} h_{m-a}} + \frac{x}{A_o \kappa} + \frac{x'}{A' \kappa'} + \frac{x}{A_i \kappa} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.08}$$

Donde :

$h_o$  : Coeficiente de transferencia del lado agua =  $933.80 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

$h_{m-a}$  : Coeficiente de transferencia del lado medio ambiente (m-a)

$\kappa$  Conductividad térmica de la pared (acrílico) =  $0.200 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\kappa'$  Conductividad térmica del aislante =  $0.050 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$x$  Espesor de la pared ( $\frac{1}{4}$ " ) =  $0.006 \text{ m}$

$x'$  Espesor de la pared de aislante =  $0.046 \text{ m}$

$A_2$  : Area de la superficie correspondiente a  $U_2$  =  $4.02 \text{ m}^2$

$A_0$  : Area de la superficie correspondiente a  $h_o$  =  $3.36 \text{ m}^2$

$A_i, A_{m-a}$  : Area de la superficie correspondiente a  $h_{m-a}$  =  $4.02 \text{ m}^2$

$A'$  : Area de la superficie correspondiente a  $k'$  =  $3.69 \text{ m}^2$

*\* Hallamos el coeficiente de calor del lado del medio ambiente,  $h_{m-a}$  :*

Aplicamos las mismas ecuaciones que para el caso de Convección Natural Lado Aire, con las consideraciones en los cambios de las temperaturas  $T_w = 27.0 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , así como de la longitud  $L_o$  para una placa vertical ( $L_o = 0.723 \text{ m}$ ) :

Reemplazando valores en Ec.06, para determinar el Número de Grashof,  $Gr$  :

$$\Rightarrow Gr = 3.34 \text{ E}+08$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 2.34 \text{ E}+08 \quad \text{Flujo laminar}$$

Luego, de la Ec.05 hallamos el coeficiente de transferencia de calor,  $h_{m-a}$  :

$$\Rightarrow \underline{h_{m-a} = 2.50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Finalmente, reemplazamos este valor y los anteriores que son datos en la Ec. 08, para hallar el valor del Coeficiente Global de Transferencia,  $U_2$  :

$$\Rightarrow \underline{U_2 = 0.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### **b.3) Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor - $U_3$**

Este Coeficiente Global  $U_3$ , pertenece a la transferencia de calor (pérdidas), entre la tapa de la cámara de pulverización y el medio ambiente, la Ecuación General para este caso está dada por :

$$\bullet \quad \frac{1}{U_3} = \frac{1}{h_{l-a}} + \frac{1}{h_i} + \frac{x}{\kappa} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.09}$$

Donde :

$h_{l-a}$  : Coeficiente de transferencia del lado ambiente (l-a)

$h_i$  : Coeficiente de transferencia del lado aire = 3.16  $\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$

$\kappa$  : Conductividad térmica de la pared (acrílico) = 0.200 W/m.°C

$x$  : Espesor de la pared (¼") = 0.006 m

\* *Hallamos el coeficiente de transferencia de calor del lado ambiente,  $h_{l-a}$  :*

Aplicamos las mismas ecuaciones que para el caso de Convección Natural Lado Aire, con las consideraciones en los cambios de las temperaturas  $T_w = 27.5$  °C y  $T = 20.0$  °C, así como de la longitud promedio :  $L_{prom}$  , para una placa horizontal ( $L_{prom} = 1.09$  m) :

Reemplazando valores en Ec.06a, para determinar el Número de Grashof, Gr :

$$\Rightarrow Gr = 1.22 \text{ E}+09$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 8.54 \text{ E}+08 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Luego, de la Ec.05a hallamos el coeficiente de transferencia de calor,  $h_{l-a}$  :

$$\Rightarrow \underline{h_{l-a} = 2.97 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Finalmente, reemplazamos este valor y los anteriores que son datos en la Ec. 09, para hallar el valor del Coeficiente Global de Transferencia,  $U_3$  :

$$\Rightarrow \underline{U_3 = 1.40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

**C.- CALOR NETO NECESARIO PARA MANTENER LA CAMARA**

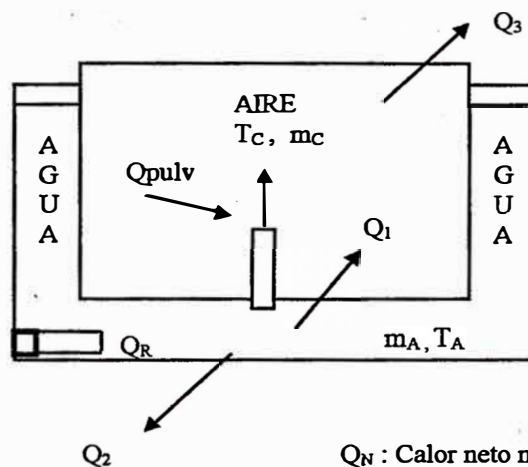
**A  $T = 35^{\circ}\text{C}$**

\* Del Balance de Energía en la cámara de pulverización, tenemos :

$$* Q_N = Q_1 + Q_2$$

\* Asimismo determinamos que :

$$* Q_1 = Q_3 + Q_{\text{pulveriz}}$$



$Q_N$  : Calor neto necesario para mantener el sistema  
 $Q_1$  : Calor transferido a la cámara del medio calefactor  
 $Q_2$  : Calor perdido por el fondo de la cámara al medio  
 $Q_3$  : Calor perdido por la tapa de la cámara al medio  
 $Q_{\text{pulv}}$  : Calor dado a la solución pulverizada  
 $A_i$  : Area de transferencia de calor involucrada  
 $U_i$  : Coeficiente global de transferencia de calor

\* Calculando el calor dado a la solución pulverizada,  $Q_{\text{pulv}}$  :

$$Q_{\text{pulv}} = m_{\text{aire}} \cdot C_p \cdot \Delta T_{\text{aire}} + m_{\text{salmuera}} \cdot C_p \cdot \Delta T_{\text{salm}} \dots\dots(a)$$

\* De los datos experimentales tenemos que

$$\text{flujo del aire: } \dot{q}_{\text{aire}} = 15.98 \text{ ft}^3/\text{hr} \quad \text{y} \quad \rho_{\text{aire}} = 2.50 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{flujo de salmuera : } q_{\text{salmuera}} = 2330.0 \text{ ml/hr de recolectado}$$

Los valores de Cp se calculan a condiciones promedio de temperatura.

$$\text{Luego, } m_{\text{aire}} = 3.14 \text{ E-04 Kg/s}$$

$$\Rightarrow m_{\text{salmuera}} = 6.47 \text{ E-04 Kg/s}$$

Reemplazando en Ecuación. (a), tendremos el valor de  $Q_{\text{pulv}}$ :

$$\Rightarrow \underline{Q_{\text{pulv}} = 42.20 \text{ W}}$$

\* Hallando los valores de  $Q_2$  y  $Q_3$ :

$$Q_2 = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T = 0.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} * 4.02 \text{ m}^2 * (45 - 20) \text{ °C} = 68.34 \text{ W}$$

$$Q_3 = U_3 \cdot A_3 \cdot \Delta T = 1.40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} * 1.48 \text{ m}^2 * (35 - 20) \text{ °C} = 31.08 \text{ W}$$

\* Finalmente, podemos hallar el valor del Calor Neto necesario,  $Q_N$ :

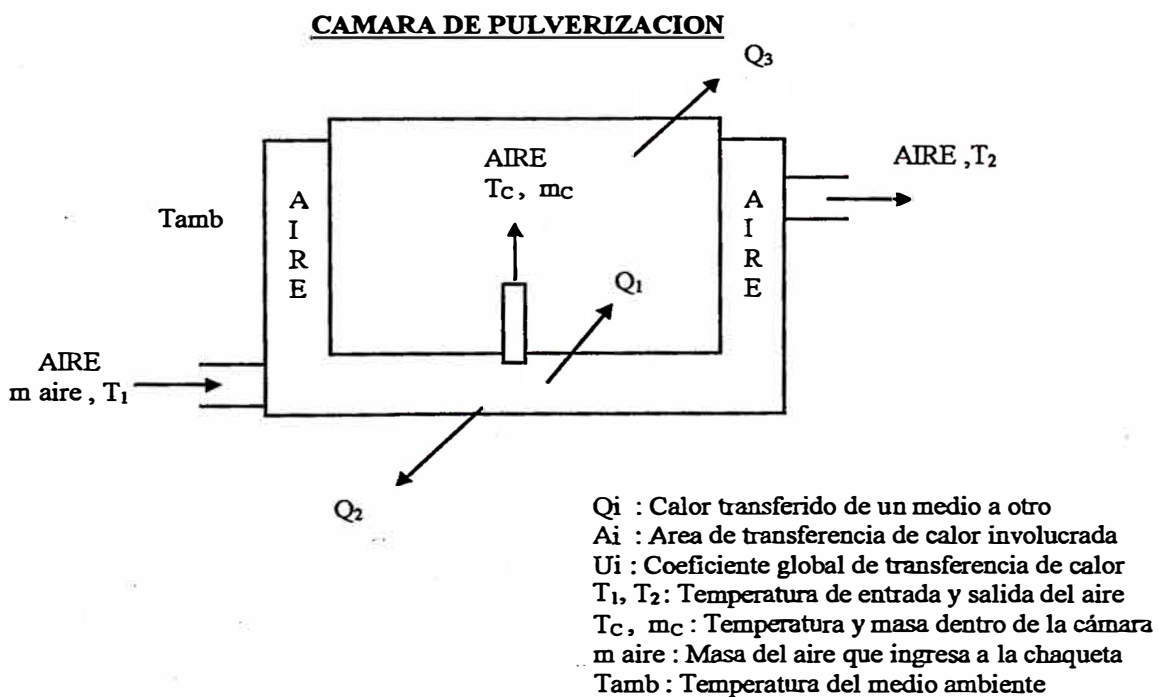
$$\Rightarrow \underline{Q_N = 141.62 \text{ W}}$$



### 5.5.6.2 CALCULO USANDO UNA CHAQUETA DE AIRE

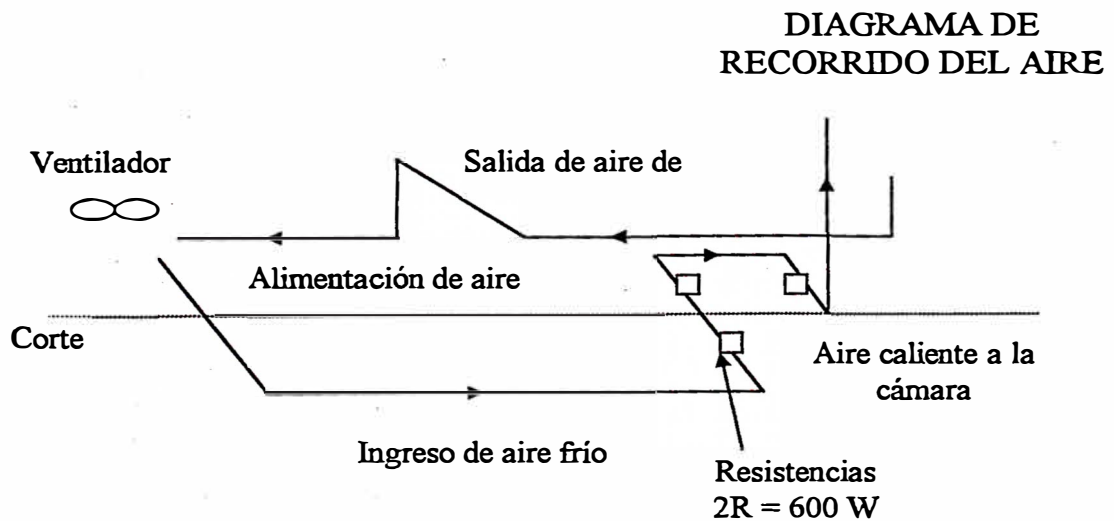
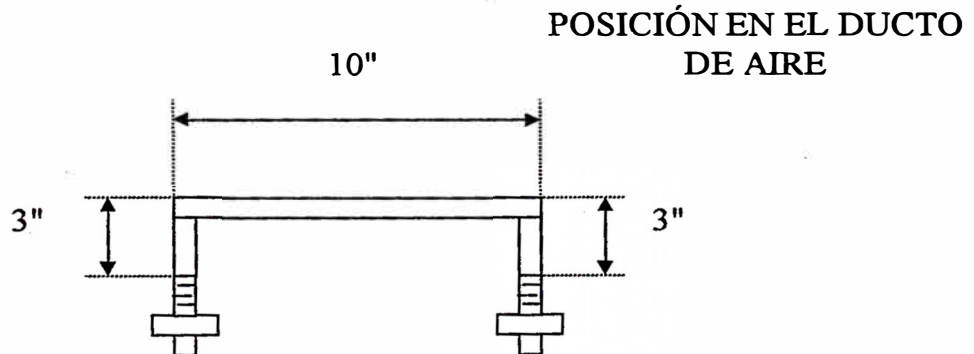
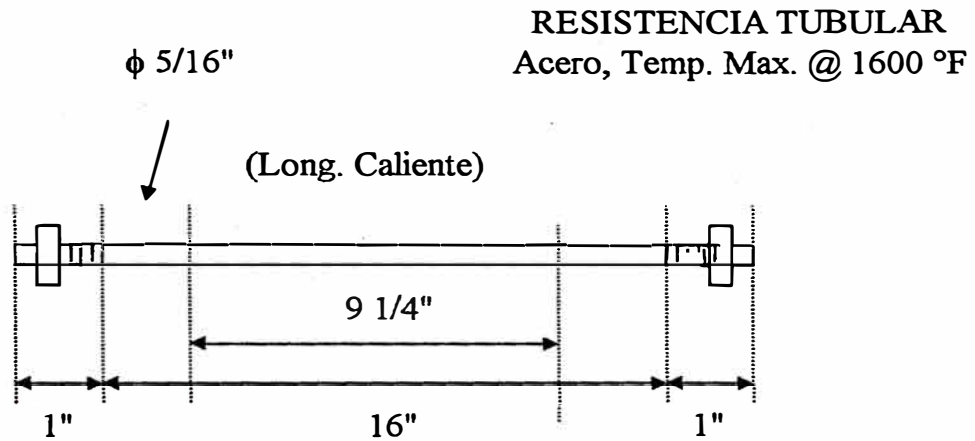
En este segundo caso se usará una chaqueta de aire como medio calefactor, calentando las paredes internas y el fondo de la cámara. El aire se calentará por medio de una resistencia eléctrica para aire y es ingresado al sistema por medio de un ventilador centrífugo de potencia conocida, el cual sale luego de su paso por la chaqueta <sup>(28)</sup>.

En la solución de este caso se consideró la media aritmética de la diferencia de temperaturas en vez de usar el criterio de LMTD; esto reduce considerablemente los cálculos y el margen de error es mínimo respecto del otro criterio.



## DIAGRAMA DE LAS RESISTENCIAS USADAS

### EN LA CHAQUETA DE AIRE



**A.- ESTADO NO ESTACIONARIO**

\* Efectuamos el Balance de Energía en la Chaqueta de aire :

$$m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} (T_1 - T_2) = A_1/2 \cdot U_1 (T_1 + T_2 - 2T_C) + A_2/2 \cdot U_2 (T_1 + T_2 - 2T_{\text{amb}})$$

....Ec.10

\* Efectuamos el Balance de Energía en la Cámara de pulverización :

$$m_C \cdot C_{vC} \cdot dT_C / dt = A_1/2 \cdot U_1 (T_1 + T_2 - 2T_C) - A_3/2 \cdot U_3 (T_C - T_{\text{amb}})$$

.....Ec.11

\* De la Ec.10 despejamos  $T_2$ , y lo reemplazamos en la Ec.11, luego tendremos una Ecuación Diferencial del tipo simple para su resolución, así :

$$T_2 = \frac{(2 m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} - A_1 \cdot U_1 - A_2 \cdot U_2) T_1 + 2A_1 \cdot U_1 \cdot T_C + 2A_2 \cdot U_2 \cdot T_{\text{amb}}}{(2 m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} + A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2)}$$

Remplazando esta relación obtenida :

$$m_C \cdot C_{vC} \cdot \frac{dT_C}{dt} = A_1 U_1 \left\{ \frac{4m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} T_1 + 2A_2 U_2 T_{\text{amb}} - (4m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} + 2A_2 U_2) T_C}{(2 m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} + A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2)} \right\} - A_3 U_3 (T_C - T_{\text{amb}})$$

Reordenando esta Ec. Diferencial tiene la siguiente forma, que es posible integrar usando tablas matemáticas :

$$\text{Ec. Dif. : } \alpha - \beta \cdot T_C = dT_C / dt \Rightarrow$$

$$t = -1/\beta \cdot \ln \left[ \frac{(\alpha - \beta T_C)}{(\alpha - \beta T_{C0})} \right]$$

Despejando  $T_C$  en función del tiempo  $t$ , tenemos también :

$$\Rightarrow T_C = \alpha/\beta - (\alpha/\beta - T_{C0}) \cdot e^{-\beta t}$$

Donde los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ , está dados por :

$$\alpha = \frac{A_1 \cdot U_1}{m_c \cdot C_{vc}} \cdot (2 m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} \cdot T_1 + A_2 \cdot U_2 \cdot T_{\text{amb}}) + \frac{A_3 \cdot U_3 \cdot T_{\text{amb}}}{m_c \cdot C_{vc}}$$

$$\beta = \frac{A_1 \cdot U_1}{m_c \cdot C_{vc}} \cdot (2 m_{\text{aire}} \cdot C_{p\text{aire}} + A_2 \cdot U_2) + \frac{A_3 \cdot U_3}{m_c \cdot C_{vc}}$$

\* De los datos siguientes de características de la cámara y las condiciones de operación fijadas podemos evaluar estos valores; asimismo consideramos los valores de  $U_i$  que son hallados en Estado Estacionario posteriormente

$$U_1 = 2.19 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad A_1 = 2.16 \text{ m}^2 \quad T_1 = 54.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_2 = 1.09 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad A_2 = 2.60 \text{ m}^2 \quad T_{Co} = 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_3 = 1.44 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad A_3 = 1.48 \text{ m}^2 \quad T_{amb} = 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m_{aire} = 0.04 \text{ Kg / sg} \quad m_C = 0.74 \text{ Kg}$$

$$Cp_{aire} = 1000 \text{ J / Kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad C_{vC} = 714 \text{ J / Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{Hallando : } \alpha = 0.528 \quad \text{y} \quad \beta = 0.01249$$

\* De esta forma obtenemos :

$$\Rightarrow T_C = 42.25 - 22.25 e^{-0.01249 t}$$

$$\Rightarrow \underline{T_2 = 50.52 - 2.40 e^{-0.01249 t}}$$

- Si tabulamos valores para hallar la diferencia de temperaturas de salida del aire en la chaqueta ( $T_2$ ), y la temperatura de la cámara ( $T_C$ ), según un tiempo de calentamiento  $t$  fijado, tendremos :

Tiempo $t$ (seg.)*	$T_C$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_2$ ( $^\circ\text{C}$ )
0.00	20.0	48.12
100.00	35.9	49.84
200.00	40.4	50.32
400.00	42.1	50.50

\* Para efectos reales de operación se puede considerar un factor de seguridad de 1.15 a estos tiempos.

## B.- ESTADO ESTACIONARIO

### b.1) Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor - $U_1$

\* Cálculo del Coeficiente de Transferencia en la Chaqueta de aire ,  $h_{ch-a}$  :

De los datos tenemos que el flujo másico de aire que ingresa a la chaqueta es 0.04 Kg/s, por lo que podemos calcular el Número de Reynolds del aire conociendo los demás parámetros y las propiedades del aire halladas a temperatura promedio de entrada y salida de la chaqueta :

$$Re_{aire} = \rho \cdot v \cdot De / \mu = m_{aire} \cdot De / (A \cdot \mu)$$

SECCIÓN TRANSVERSAL  
DE LA CHAQUETA

$$\text{Diámetro equivalente : } De = \frac{2(l)(h)}{(l+h)} = 0.0925 \text{ m}$$



$$\text{Area transversal al flujo : } A = l \cdot h = 0.031 \text{ m}^2$$

$$l = 0.62 \text{ m}$$

Luego calculando el Reynolds :

$$\Rightarrow Re_{aire} = 6056.61 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Con este dato de  $Re_{aire}$ , podemos hallar el Número de Nusselt,  $Nu$ , para el aire, usando la ecuación de N. Ozisik <sup>(27)</sup>:

$$\Rightarrow Nu = 0.036 Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot (D/L)^{0.055} \quad \text{para : } 10 < L/D < 400$$

En nuestro caso  $L = 3.8 \text{ m}$  y  $rD = De = 0.0925 \Rightarrow L/De = 41.1$  (cumple)

Reemplazando valores :

$$\Rightarrow \underline{Nu = 33.92}$$

Este valor de Nu lo usamos en la ecuación siguiente para hallar el coeficiente de transferencia en la chaqueta,  $h_{ch-a}$  :

$$\Rightarrow \underline{h_{ch-a} = Nu \cdot \kappa / De = 10.20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

*\* Cálculo del Coeficiente de Transferencia en la cámara,  $h_0$*

Las ecuaciones a usar son las mismas que en el caso de Chaqueta de Agua, pero considerando Convección Natural del Lado Aire (placa vertical) :

$$h = 1.42 [(T - Tw) / L]^{0.25} \dots\dots\dots \text{Ec.05}$$

$$Gr = g \cdot \beta (Tw - T) \cdot L^3 / \nu^2 \dots\dots\dots \text{Ec.06}$$

Valores de los parámetros para realizar los cálculos :

$$\begin{aligned}
 T_w &= 48.0 && ^\circ\text{C} \\
 T &= 35.0 && ^\circ\text{C} \\
 g &= 9.82 && \text{m}/\text{sg}^2 \\
 \beta &= 3.2\text{E-}03 && ^\circ\text{C}^{-1} \\
 \nu &= 1.92 \text{ E-}05 && \text{m}^2/\text{sg} \\
 L_0 &= 0.62 && \text{m} \\
 Pr &= 0.70
 \end{aligned}$$

Todas las propiedades del aire se evalúan a  $(T_w + T) / 2 = 41.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Reemplazando valores en Ec.06, para determinar el Número de Grashof, Gr :

$$\Rightarrow Gr = 2.691 \text{ E+}08$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 1.884 \text{ E+}08 \quad \text{Flujo laminar}$$

Finalmente, de la Ec.05 hallamos el coeficiente de transferencia de calor  $h$  :

$$\Rightarrow \underline{h_0 = 3.04 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$



\* *Cálculo del Coeficiente Global,  $U_1$*

De la ecuación general

$$\bullet \quad \frac{1}{U_1} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{ch-a}} + \frac{x}{\kappa} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.12}$$

Donde :

$h_o$  : Coeficiente de transferencia del lado cámara

$h_{ch-a}$  : Coeficiente de transferencia del lado aire de calefacción

$\kappa$  Conductividad térmica de la pared (acrílico) = 0.200 W/m.°C

$x$  Espesor de la pared (1/4") = 0.006 m

Reemplazando valores obtenidos en Ec.12, tendremos :

$$\Rightarrow \underline{U_1 = 2.19 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

**b.2) Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor -  $U_2$**

Este Coeficiente Global  $U_2$ , pertenece a la transferencia de calor del aire de calefacción (pérdidas), entre la pared del fondo de la cámara de pulverización y el medio ambiente, la Ecuación General para este caso será :

$$\bullet \quad \frac{1}{A_2 U_2} = \frac{1}{A_{ch-a} h_{ch-a}} + \frac{1}{A_{ch-ma} h_{ch-ma}} + \frac{x}{A_o \kappa} + \frac{x'}{A' \kappa'} + \frac{x}{A_i \kappa} \dots \text{Ec.13}$$

Donde :

$h_{ch-a}$  : Coeficiente transfer. del lado de la chaqueta aire =  $10.20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

$h_{ch-ma}$  : Coeficiente de transfer. de la chaqueta al medio ambiente (ch-ma)

$\kappa$  Conductividad térmica de la pared (acrílico) =  $0.200 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\kappa'$  Conductividad térmica del aislante (lana mineral) =  $0.050 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$x$  Espesor de la pared ( $\frac{1}{4}$ " ) =  $0.006 \text{ m}$

$x'$  Espesor de la pared de aislante =  $0.02 \text{ m}$

$A_2$  : Area de la superficie correspondiente a  $U_2$  =  $2.60 \text{ m}^2$

$A_{ch-a}$  : Area de la superficie correspondiente a  $h_{ch-a}$  =  $2.44 \text{ m}^2$

$A_i, A_{ch-ma}$  : Area de la superficie correspondiente a  $h_{ch-ma}$  =  $2.60 \text{ m}^2$

$A'$  : Area de la superficie correspondiente a  $k'$  =  $2.52 \text{ m}^2$

*\* Hallamos el coeficiente de calor del lado del medio ambiente,  $h_{ch-ma}$  :*

Aplicamos las mismas ecuaciones que para el caso de Convección Natural Lado Aire, con las consideraciones en los cambios de las temperaturas  $T_w = 33.0 \text{ }^\circ\text{C}$  (pared) y  $T = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$  (ambiente), así como de la longitud  $L_o$  para una placa vertical ( $L_o = 0.62 \text{ m}$ ) :

Reemplazando valores en Ec.06, para determinar el Número de Grashof, Gr :

$$\Rightarrow Gr = 3.722 E+08$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 2.605 E+08 \quad \text{Flujo laminar}$$

Luego, de la Ec.05 hallamos el coeficiente de transferencia de calor,  $h_{ch-ma}$  :

$$\Rightarrow \underline{h_{ch-ma} = 2.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Finalmente, reemplazamos este valor y los anteriores que son datos en la Ec.13,

para hallar el valor del Coeficiente Global de Transferencia,  $U_2$  :

$$\Rightarrow \underline{U_2 = 1.09 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### **b.3) Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor - $U_3$**

Este Coeficiente Global  $U_3$ , pertenece a la transferencia de calor (pérdidas), entre la tapa de la cámara de pulverización y el medio ambiente, la Ecuación General para este caso está dada por :

$$\bullet \quad \frac{1}{U_3} = \frac{1}{h_{t-a}} + \frac{1}{h_i} + \frac{x}{\kappa} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.14}$$

Donde :

$h_{t-a}$  : Coeficiente de transferencia de la tapa al ambiente (t-a)

$h_0$  Coeficiente de transferencia del lado cámara =  $2.77 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

$\kappa$  Conductividad térmica de la pared (acrílico) =  $0.200 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$x$  Espesor de la pared ( $\frac{1}{4}$ " ) =  $0.006 \text{ m}$

*\* Hallamos el coeficiente de transferencia de calor del lado ambiente,  $h_{t-a}$*

Aplicamos las mismas ecuaciones que para el caso de Convección Natural Lado Aire, con las consideraciones en los cambios de las temperaturas  $T_w = 27.5 \text{ }^\circ\text{C}$  (tapa) y  $T = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$  (ambiente), así como de la longitud  $L_{prom}$  para una placa horizontal ( $L_{prom} = 1.09 \text{ m}$ ) :

Reemplazando valores en Ec.06a, para determinar el Número de Grashof, Gr :

$$\Rightarrow Gr = 1.26 \text{ E}+12$$

Con ello hallamos el tipo de flujo:

$$\Rightarrow Gr \cdot Pr = 8.85 \text{ E}+11 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Luego, de la Ec.05a hallamos el coeficiente de transferencia de calor,  $h_{l-a}$  :

$$\Rightarrow \underline{h_{l-a} = 2.97 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Finalmente, reemplazamos este valor y los anteriores que son datos en la Ec. 14, para hallar el valor del Coeficiente Global de Transferencia,  $U_3$

$$\Rightarrow \underline{U_3 = 1.44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

### C.- CALOR NETO NECESARIO PARA MANTENER LA CAMARA

$$\underline{A \ T = 35 \text{ °C}}$$

\* Del Balance de Energía en la cámara de pulverización, tenemos :

$$* \ Q_N = Q_2 + Q_3 + Q_{\text{pulv}}$$

\* Luego, determinamos las siguientes relaciones de calor en la cámara y su entorno:

$$Q_1 = A_1 \cdot U_1 \cdot (T_{\text{aire}} - T_C) = 2.16 \cdot 2.19 \cdot (52.5 - 35.0) = 82.78 \text{ W}$$

$$Q_2 = A_2 \cdot U_2 \cdot (T_{\text{aire}} - T_{\text{amb}}) = 2.60 \cdot 1.09 \cdot (52.5 - 20.0) = 92.10 \text{ W}$$

$$Q_3 = A_3 \cdot U_3 \cdot (T_C - T_{\text{amb}}) = 1.48 \cdot 1.44 \cdot (35.0 - 20.0) = 31.97 \text{ W}$$

\* Finalmente reemplazando valores de  $Q_2$  y  $Q_3$  obtenidos anteriormente, así como de  $Q_{\text{pulv}}$ , podemos hallar el Calor Neto necesario,  $Q_N$  :

$$\Rightarrow \underline{Q_N = 166.27 \text{ W}}$$

**D.- CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL AIRE A  $T_1 = 54.0\text{ }^\circ\text{C}$**

\* Del Balance de Energía en el aire que ingresa a la chaqueta :

$$Q_{\text{neces}} = m_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} \cdot \Delta T = 0.04 \text{ Kg/s} * 1000 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C} * (54.0 - 20.0) ^\circ\text{C} = 1360 \text{ W}$$

\* Asumimos, una eficiencia del 80% de transmisión del calor necesario, luego

$$\Rightarrow \underline{Q_{\text{neces}} = 1360 \text{ W} / 0.80 = 1700 \text{ W}} \quad (\text{al inicio})$$

Observ. : Para este calentamiento inicial se podría tener 6 resistencias eléctricas para aire de tipo tubular de 300 W cada una, para calentar el aire que ingresa a la chaqueta <sup>(28)</sup>.

\* Una vez que la cámara alcanza los  $35^\circ\text{C}$ , es factible poder recircular el aire caliente que sale a  $T_2 = 50.0\text{ }^\circ\text{C}$ ; de esta manera sólo será necesario calentarlo en  $4.0\text{ }^\circ\text{C}$ , para alcanzar la temperatura inicial de ingreso a la chaqueta.

$$Q'_{\text{neces}} = m_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} \cdot \Delta T' = 0.04 \text{ Kg/s} * 1000 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C} * 4.0\text{ }^\circ\text{C} = 160.0 \text{ W}$$

$$\Rightarrow \underline{Q'_{\text{neces}} = 160.0 \text{ W} / 0.80 = 200.0 \text{ W}} \quad (\text{en S. S.})$$

Esto indica que luego de alcanzar los 35°C en la cámara sólo se necesitará una resistencia de esta potencia; es natural que al inicio la resistencia necesaria sea de gran potencia la cual a medida que la cámara se calienta disminuya el calor requerido, debido al aumento de la temperatura de salida del aire,  $T_2$ . Es factible colocar un termostato en el ingreso de aire de manera que una vez que se alcance la temperatura deseada en la cámara, este dispositivo regule el encendido y apagado de la resistencia del aire.

En el caso de que se realicen pruebas en la cámara de pulverización a  $T_C = 50.0$  °C, se requerirá que el aire ingrese a la chaqueta a  $T_1 = 65$  °C, necesitando un tiempo de calentamiento de 400 sg. aproximadamente.

### **E.- CALOR DE LA POTENCIA NECESARIA DEL VENTILADOR**

La ecuación para calcular la potencia del ventilador a usar para trasladar el aire de calentamiento por la chaqueta de la cámara <sup>(29)</sup>, esta dada por :

$$* \underline{P_{vent} = \rho_f \cdot g \cdot Q_f \cdot H_f} \dots\dots\dots Ec.15 \quad \text{Donde: } H = \Sigma \text{ pérdidas (mts)}$$

$Q_f =$  caudal del fluido (aire)

$$H_f = \frac{\Sigma V_1^2 \cdot [\Sigma L + \Sigma \lambda \cdot L/D]}{2g} \quad L = \text{coef. pérdidas secundarias}$$

$\lambda =$  coef. pérdidas primarias

Así :

$$H_f = \frac{V_1^2}{2g} \cdot [ L_1 + \lambda_1 \cdot L_1/D_1 + (L_2 + \lambda_2 \cdot L_2/D_2)(D_1/D_2)^2 + (L_3 + \lambda_3 \cdot L_3/D_3)(D_1/D_3)^2 ]$$

Datos para el cálculo :

$$L_{\text{codo}} = 0.4 \quad L_{\text{ensanch. brusco}} = 0.5 \quad L_{\text{contracc brusco}} = 0.37$$

$$D_1 = 4'' = 0.101 \text{ m} \quad D_2 = 0.0925 \text{ m} \quad D_3 = 4'' = 0.101 \text{ m}$$

$$L_1 = 3.0 \text{ m} \quad L_2 = 3.8 \text{ m} \quad L_3 = 1.5 \text{ m}$$

$$V_1 = Q_f / A_1 = m_{\text{aire}} / (A_1 \cdot \rho_f) = 4.11 \text{ m/s} \quad Re_i = \rho_f \cdot V_i \cdot D_i / \mu_f$$

Luego, determinamos los valores de los coeficientes de pérdidas secundarios :

$$L_1 = 3.60 \quad Re_1 = 2767.40$$

$$L_2 = 1.20 \quad Re_2 = 6182.80$$

$$L_3 = 0.40 \quad Re_3 = 2767.40$$

\* Ahora, calculamos los valores de los coef. de pérdidas primarios :

$$\text{Sean } L_1 \text{ y } L_3 \text{ acero} \Rightarrow \text{Para } L_1 \quad \kappa = 0.25 \text{ mm} \rightarrow \kappa / D_1 = 0.0025$$

$$\text{Para } L_3 \quad \kappa = 0.25 \text{ mm} \rightarrow \kappa / D_3 = 0.0025$$

Usando el Diagrama de Moody<sup>(23)</sup>, para determinar los valores de los coeficientes:

$$\lambda_1 = 0.027 \quad \lambda_2 = 0.031 \quad \lambda_3 = 0.027$$



$L_1$  : Tramo antes de entrar a la cámara

$L_2$  : Tramo dentro de la chaqueta

$L_3$  : Tramo después de la cámara (retorno)

\* Reemplazando los valores obtenidos, para hallar el valor de  $H_f$  :

$$\Rightarrow H_f = 7.07 \text{ m}$$

\* Finalmente, podemos la Potencia teórica del ventilador de la Ec. 15 :

$$\Rightarrow \text{Pot. teórica} = 2.80 \text{ W}$$

Considerando una eficiencia real del equipo del 80%, obtenemos el valor de la potencia efectiva del ventilador :

$$\Rightarrow \underline{\text{Pot. necesaria} - 3.50 \text{ W}}$$

## 5.6 SELECCIÓN DEL COMPRESOR DE AIRE

El aire comprimido de abastecimiento que va a la tobera, debe ser mantenido entre 10 - 25 Psi, que es el rango de operación recomendado (ASTM B117), asimismo se debe suministrar un flujo de aire máximo de 3.5 pie<sup>3</sup>/min, con estas consideraciones podemos determinar la potencia teórica del compresor a seleccionar.

De la ecuación general para compresores, tenemos :

$$H_p = 3.03 \text{ E-05} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P_1 \cdot q_1 \cdot \left[ \frac{(P_2)^{(\gamma-1)/\gamma}}{P_1} - 1 \right] \quad (\text{en unid. inglesas})$$

Donde :

$$P_1 = 14.7 \text{ Psia} = 2116.8 \text{ lbf/pie}^2 \quad (\text{Presión de entrada})$$

$$P_2 = 80.0 \text{ Psia} = 11520.0 \text{ lbf/pie}^2 \quad (\text{Presión de salida})$$

$$q_1 = 3.5 \text{ pie}^3/\text{min} \quad (\text{Flujo volumétrico de aire de entrada})$$

$$\gamma = C_p / C_v = 1.4 \quad (\text{del aire})$$

Reemplazando valores :

$$\Rightarrow H_p = 0.489 \text{ HP} \quad (\text{teórico})$$

Asumiendo una eficiencia del compresor de 80% , tendremos:

$$\Rightarrow H_p = 0.61 \text{ HP} \quad (\text{real})$$

Para efectos prácticos de selección del equipo, elegimos un **Compresor de tipo Centrifugo de 0.75 HP.**

Asimismo , teniendo en cuenta las pérdidas de carga en el trayecto del aire hasta la tobera (debemos asegurar que en la columna de humidificación exista como mínimo 22 psi), tomamos como  $P_2 = 40.0 \text{ Psi}$ , como valor promedio de presión

de descarga a la salida del compresor. Para mayor seguridad de tener siempre esta presión durante la operación de la cámara puede ser controlada con una válvula solenoide.

Actualmente tenemos en el Área de Corrosión de la F.I.Q.M., un equipo Compresor de tipo Reciprocante de 1.5 HP, es decir que entrega una presión de aire comprimido oscilante, el cual varía entre 0 - 80 Psi, que contiene a la salida un filtro de polvo y de humedad, para evitar que se introduzca elementos extraños al sistema.

Para fines prácticos, también es posible utilizar este equipo con la adición de un sistema de control básico de flujo, a base de una válvula solenoide de poca oscilación conectada a un manómetro, con un rango muy sensible de 39.5 - 40.5 Psi con Set Point en 40.0 Psi (presión de descarga mínima); esto nos permitirá tener menos variaciones en el ingreso de aire comprimido al sistema y lograr una mejor performance del equipo.

Para las pruebas en la cámara actual se acondicionó una válvula de tipo aguja a la salida del compresor, para controlar manualmente el flujo y presión del mismo. Asimismo, se redujo el rango de entrega de aire del compresor a 20 - 50 Psi.

## 5.7 DETERMINACION DE LOS MATERIALES A USAR EN LA FABRICACION DE LA CAMARA.

La elección correcta de los materiales adecuados de fabricación se basará en la buena resistencia al medio de exposición y en un análisis económico, que tenga en cuenta diversos materiales posibles. Asimismo, debemos considerar como factor de decisión el hecho de que la cámara tiene también fines de aprendizaje y estudio de los fenómenos que ocurren en el equipo.

Los materiales a usarse pueden ser

- a) Acero al carbono, el cual debe ser cubierto con caucho, fibra de vidrio, etc.
- b) Plásticos, como el poliestireno, poliacrílico, PVC, etc.

El equipo completo : cabina, tanque de solución salina y columna de humidificación, se fabricará en material acrílico cristal (polimetacrilato de metilo), que es más económico que el acero, además no es atacado por sales inorgánicas, ácidos débiles ni variaciones de pH.

Este tipo de polímero es muy resistente, puede operar sin problemas entre los 60 a 88 °C <sup>(30)</sup>. Finalmente, el uso del acrílico sirve perfectamente para los fines didácticos esperados del equipo.

## 5.8 DIAGRAMA FINAL DEL SISTEMA PLANTEADO

Al final del presente trabajo se adjunta los diseños del sistema planteado en Software AutoCad V. 13.0, considerando las dos alternativas de medio de calefacción, en planos de formato A3.

## ***CAPITULO VI.- ESTIMACION DE COSTOS***

Debido a la importancia de realizar pruebas de control de calidad y resistencia de sus productos las compañías fabricantes de pinturas industriales optan por una de las siguientes alternativas cuando tienen que realizar ensayos en cámaras de pulverización salina

- \* Adquirir el equipo en mención, a alguna empresa fabricante internacional.
- \* Emplear los servicios de una institución, que les dé la certificación de la buena performance de sus productos.
- \* Evitar realizar estos ensayos y lanzar al mercado un producto con el riesgo de ser rechazado por deficiencias después de aplicado.

Definitivamente, toda empresa que se considere seria y con aspiraciones de lograr un buen posicionamiento en el mercado industrial, optaría por alguna de las dos primeras alternativas. Además, si tenemos en cuenta que el costo de estos equipos es muy elevado y que las pruebas se realizan cada vez que elaboran un lote nuevo, es evidente que la segunda opción resulta mucho más viable para un gran número de empresas nacionales.

Como ejemplo, tenemos que el costo de un equipo de tamaño comercial similar al que se propone (capacidad de 600 lts.), oscila entre los US \$ 13,000.00 <sup>(31)</sup>.

En nuestro medio operan alrededor de 25 compañías fabricantes de pinturas industriales, de las cuales el 80% pertenecen al grupo de pequeña y mediana industria, y son las que en su mayoría carecen de estos equipos y acuden a instituciones de prestigio como el SIMA-Callao o el Instituto de Corrosión de la PUCP, para que les realicen estas pruebas. Es aquí donde la U.N.I. puede ingresar como una mejor alternativa para realizar estos ensayos.

## 6.1 CRITERIOS DE DECISION PARA LA REALIZACION DEL PROYECTO

Creemos que el desarrollo técnico-económico del presente proyecto puede servir (con la inversión adicional del caso), en una fuente interesante, a corto plazo, de generación de recursos por prestación de servicios de la Facultad; pues lo que se pretende es dejar sentadas las pautas para el rediseño y mejoramiento de la cámara de pulverización salina actual.

Dentro de este concepto efectuamos la evaluación económica del proyecto para comprobar la viabilidad del mismo para su ejecución.

Debemos indicar que para la valoración del costo del sistema planteado se ha elegido como sistema de calefacción usar una chaqueta de agua, en razón de que sistemas de calentamiento (aire y agua) son igualmente usados por los fabricantes.

## 6.2 BALANCE DE GASTOS A REALIZAR

## 6.2.1 ADQUISICIÓN DE BIENES PARA EQUIPAMIENTO

ITEM	CANT.	DESCRIPCION	COSTO (US \$)
1	01	Compresor centrífugo de 0.75 HP para suministro de aire, incluye sistema de filtro de aire/humedad.	250.00
2	01	Fabricación de una cámara de pulverización de doble pared de 615 lts. en material de acrílico.	750.00
3	01	Columna de humidificación de 16 lts. en acrílico	190.00
4	01	Tanque cilíndrico para solución salina de 114 lt. en material acrílico	220.00
5	01	Resistencia eléctrica de agua de 650W, para la columna de humidificación	15.00
6	04	Resistencias eléctrica de agua de 400W c/u, para el sistema de calefacción de la cámara	100.00
7	02	Termostatos eléctricos para la columna de humidificación y la chaqueta de calefacción. (agua)	150.00
8	01	Rotámetro para flujo de aire de 0-60 SCFH	90.00
9	01	Rotámetro para flujo de solución salina	110.00
10	02	Termómetro de 0 - 100 °C	50.00
11	02	Manómetros de 0 - 60 Psi	60.00



12	01	Válvula solenoide de ½ " para regular ingreso de aire del compresor .	350.00
13	01	Temporizador (timer), para efectuar ensayos intermitentes	190.00
14	01	Sistema de boquillas de pulverización de acuerdo a normas JIS.	100.00
15	01	Sistema de orientación del flujo de pulverización a la cámara	60.00
16	01	Sistema de control hidráulico de reposición de salmuera al tanque interno de la cámara	20.00
17	01	Panel de soporte de muestras	50.00
18	01	Tuberías, conexiones y accesorios para el sistema completo	320.00
19	01	Sistema de recolección de condensado	40.00
20	01	Bolsa de sal industrial de 50 kg.	15.00
21	01	Agua destilada de calentamiento 78 lts.	20.00
22	01	Soportes, bases y estructuras metálicas para los equipos.	135.00
23	01	Sistema de calentamiento y circulación del agua para calefacción de la cámara	105.00
		Sub - Total.....	3390.00

6.2.2 ADQUISICIÓN DE SERVICIOS PARA REALIZAR EL  
EQUIPAMIENTO

ITEM	DESCRIPCION	COSTO TOTAL (US \$)
01	Montaje e instalación de los principales equipos	180.00
02	Instalación de los circuitos eléctricos y de suministro de aire y agua.	150.00
03	Mano de obra en el acondicionamiento de los equipos en acrílico	120.00
04	Obras civiles para el soporte de la cámara y compresor (incluyendo materiales)	150.00
05	Servicios adicionales (transporte de materiales, gestiones, agua, luz, etc.)	120.00
	Sub - Total.....	720.00

### 6.2.3 BALANCE TOTAL DE GASTOS A REALIZAR

ITEM	DESCRIPCION	COSTO TOTAL (US \$)
a)	Adquisición de bienes para equipamiento	3390.00
b)	Adquisición de servicios y mano de obra	720.00
	<b>Total .....</b>	<b>4110.00</b>

### 6.3 INGRESOS POR PRESTACION DE SERVICIOS

Debemos considerar en esta parte que el equipo a diseñar y construir tendrá como finalidad a mediano plazo el brindar servicio de pruebas de muestras de pinturas para el sector industrial, para ello conocemos los costos promedio que cobran las entidades que lo hacen actualmente, así como la demanda de este tipo de servicio en el mercado.

Al costo fijo anteriormente hallado, tenemos que añadir los costos operativos propios de realizar una corrida de 120 o más horas según lo solicite el cliente.

Para efectos de cálculo, vamos a asumir que un cliente requiere de nuestros servicios para que le realicemos semanalmente una corrida continua de 120 hrs., para 10 muestras de pinturas.

ITEM	DESCRIPCION	VALOR TOTAL (US \$)
01	<u>Ingresos por servicios</u> - Cobro por 04 pruebas al mes, US \$ 2.00 / hr.	960.00
02	<u>Gastos a realizar</u> - Pago mensual de servicio de una persona que se dedique al monitoreo de la corrida, y realización del informe técnico al cliente. - Servicio mensual de luz, agua, etc.	350.00  40.00
	<b>Utilidad mensual obtenida .....</b>	<b>570.00</b>

## ***CAPITULO VII.- CONCLUSIONES FINALES***

- 1.- Los ensayos de corrosión acelerados en equipos como la cámara de pulverización salina, permiten determinar si las pinturas industriales pueden tener un mejor rendimiento y protección, cuando están expuestas por un determinado tiempo a un ambiente agresivo y corrosivo como los simulados en las pruebas.
  
- 2.- La aplicación continua de los fabricantes de pinturas, de estos ensayos en sus productos les brinda la seguridad de que sus pinturas tendrán la aceptación del mercado; asimismo las compañías transnacionales que adquieren estos productos para proteger sus estructuras de la corrosión marina, exigen a sus proveedores la certificaciones de que las pinturas hallan sido sometidas a estas pruebas.
  
- 3.- El equipo completo de la cámara de pulverización salina puede ser construido en acrílico, en razón que posee muy buena resistencia mecánica y fisico-química a las condiciones de operación del sistema . Asimismo, su uso permite la observación de la dispersión del aire en la columna de humidificación y la formación de niebla en la cabina.

4.- Se elige colocar la torre de dispersión del pulverizado (con un cono invertido al final de la misma), en el centro de la cámara, con el fin de dar una homogeneidad de la niebla producida en todo el espacio en la cabina.

5.- La tobera atomizadora a seleccionar, por su bajo costo y fácil mantenimiento estará construida en plástico o caucho.

6.- El difusor de aire en la columna de humidificación del sistema propuesto será un orificio horizontal de  $d_o = 0.0115$  m, ubicado en el centro de la base de la columna, esto de acuerdo a las consideraciones hechas en la selección del mismo.

7.- En general, dentro de la columna de humidificación, las condiciones de humedad del aire contenido en las burbujas son las que fijan la altura mínima de la columna de agua necesaria, independientemente del tamaño del resistor.

8.- En nuestro caso específico, el limitante por razones de prácticas fué la altura del resistor de agua ( $h = 25$  cm), pues de usar una altura menor se corría el riesgo de quemar la resistencia, pues necesita estar cubierta en su totalidad de líquido para funcionar.

9.- De las placas fotográficas tomadas a las burbujas formadas en la columna de humidificación, podemos comprobar que para todas las presiones de operación (5, 10 y 15 Psi), los diámetros equivalente encontrados experimentalmente en el

orificio, están dentro de lo estimado teóricamente en la ecuación de diámetro de orificio. Por ejemplo para 15 Psi :  $d_{bo} = 0.035 \text{ m}$  y  $d_b < d_{bo} = 0.00564 \text{ m}$ .

10.- Se propone que la columna de humidificación debe trabajar a una Presión mínima de 22 Psi y Temperatura de 50°C, para cumplir con las exigencias de la Norma JIS Z 2371, en cuanto a volumen promedio de recolectado por hora de exposición de niebla en una superficie de 80 cm<sup>2</sup>.

11.- Bajo las condiciones de operación anteriormente mencionados los demás parámetros derivados de ellas se encuentran dentro de lo exigido por la Norma ASTM B117, y dentro de las condiciones teóricas determinadas en el diseño de cada uno del equipos conformantes del sistema propuesto.

12.- El diseño teórico del sistema de calentamiento de la cámara se realizó en forma general para un equipo como el que se propone en el trabajo. Como caso particular se tomó 35°C como temperatura de prueba a alcanzar en la cámara (ASTM B117); no obstante ello, las ecuaciones encontradas son válidas para el cálculo a otras temperaturas de pruebas usadas en las normas.

13.- El calor necesario para mantener la cámara a 35°C, para los dos casos de calentamiento (chaqueta de agua o aire), es pequeño comparado con la potencia suministrada al sistema para elevar la temperatura inicial de la cámara de 20 a 35°C, lo que redunda en un considerable ahorro de energía en el sistema.

14.- Técnicamente, es factible optar por trabajar con los dos sistemas de calentamiento de la cámara planteados. Estas dos formas son usadas ampliamente por las compañías fabricantes de estos equipos a nivel comercial, como es el caso de Ingalco S. A., Gardner Co., Attotech Inc., Atlas S. A., etc.

15.- Asimismo, el costo de elegir un sistema u otro no es un factor económico determinante en su selección, puesto que el gasto que implican la implementación de estos medios de calentamiento no son significativos en comparación con el costo global del sistema completo. En el caso del aire, el costo se puede incrementar de 8 a 10% con respecto al costeo para la chaqueta de agua calculado anteriormente.

16.- Dentro de las consideraciones de diseño se incluye la implementación de un sistema básico de control automático en la cámara para pruebas continuas y/o intermitentes (via timer), el cual permitirá un control exacto de los principales parámetros y una buena performance del equipo; evitando en lo posible paradas innecesarias y una mínima participación del personal a cargo.

17.- Con referencia a los demás componentes del sistema se ha considerado lo siguiente: reposición de agua destilada en forma manual luego de 240 horas continuas de prueba en la columna de humidificación, y reposición continua



automática de la solución salina en el tanque interno de salmuera vía un sistema de control hidráulico tipo boya.

8.-De la evaluación de ingresos por prestación de servicios del equipo realizada, se nota la viabilidad de ejecutar el proyecto con estos fines; puesto que definitivamente redundará en beneficios inmediatos al poner el equipo al servicio del sector industrial, presentándose la U.N.I. como una alternativa adicional de interés, aplicando la estrategia de marketing idónea en los clientes potenciales.

19.- Asimismo, dentro de la óptica de uso para estudio dentro del Area de Corrosión de la Facultad; su diseño y fabricación en material acrílico permitirá de manera didáctica efectuar pruebas y evaluaciones de diferentes tipos de muestras para los ensayos ASTM mencionados en el presente trabajo, esto a nivel de nuevos proyectos de tesis o de investigación

***CAPITULO VIII.- BIBLIOGRAFIA UTILIZADA***

- 1.- Sherwin Williams Co., "Las Pinturas en la Protección Industrial", Boletín Técnico de Pinturas - Sherwin Williams Co. , USA Marzo 1991.
- 2.- ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Part 27, Philadelphia USA 1981. Normas : ASTM B117, ASTM B287, ASTM B368, ASTM G43 y ASTM D2247.
- 3.- Herbert H. Uhlig , "Corrosion Handbook", Edit. John Wiley & Sons Co., New York 1948, Cap. 9.
- 4.- National Association of Corrosion Engineers - NACE, "Basic Corrosion Course", 20<sup>th</sup> printing NACE, Texas USA, May 1982, Cap. 15, Pags. 14-22.
- 5.- Industrias Vencedor S. A., "Manual de Pinturas para Mantenimiento Industrial", Dpto. Técnico de Industrias Vencedor S. A., Lima 1975.
- 6.- Sherwin Williams Co., "Pinturas de Mantenimiento Industrial y Marinas", Boletín Técnico de Pinturas - Sherwin Williams Co., USA, Mayo - Julio 1991.

- 7.- J. H. Perry y C. H. Chilton , "Biblioteca del Ingeniero Químico", 5ª Edición Español, Mc Graw-Hill México 1990, Caps. 3 y 18, Vol. I y IV.
- 8.- J. H. Perry, Chilton y Kirkpatrick, "Chemical Engineer's Handbook", Tomo I, Mc Graw-Hill Co., USA 1963.
- 9.- Norma : DIN 50 021, "Annual Book of DIN Standards", Alemania Mayo 1975 (equivalente a ASTM B117).
- 10.- Norma : JIS Z 2371, "Annual Book of JIS Standards", Tokio Japón 1976 (equivalente a ASTM B117).
- 11.- Rev. "Corrosión y Protección", J. J. Rayuela, Vol. XV, Num. 5, Pags. 13-16, NACE 1984.
- 12.- F. A. Champion, "Ensayos de Corrosión", Urmo S. A. Ediciones Espartero, Bilbao España 1976, Cap. 4.
- 13.- Charles G. Munger, "Corrosion Prevention by Protective Coatings", NACE, Texas - USA 1984, Pags. 316-319.

- 14.- Rev. "Chemical Engineering", Ch. E. Fair, "Designing Gas-Sparged Reactors", Mc Graw-Hill Co., USA Julio 1967, Pag. 67-74.
- 15.-Rev. "Metal Finishing", A. G. Forshee, , Mc Graw-Hill Co., USA October 1991, Pags. 45-47.
- 16.-Rev. "Ingeniería Química", J. Beltrán-Heredía, C. Rodríguez y F.J. Benítez, Madrid España, a) Marzo 1990, "Parámetros de Diseño de Columnas de Burbujas I", Pags. 231-236, b) Abril 1990, "Parámetros de Diseño de Columnas de Burbujas II", Pags. 239-244.
- 17.-E. Pereda y B. Yupanqui, "Diseño y Construcción de una Cámara de pulverización Salina para ensayos de corrosión acelerados", Tesis Grado UNI, Lima Perú 1988.
- 18.-Robert E. Treybal, "Operaciones de Transferencia de Masa", 2ª Edición, Mc Graw-Hill Co., 1988, Caps. 3, 5 y 6.
- 19.-T. K. Sherwood, R. L. Pigford, y C. R. Wilke, "Transferencia de Masa", 2ª Edición, Mc Graw-Hill Co., 1975, Caps. 6 y 11.
- 20.-R. B. Bird, W. E. Stewart, y E. H. Lightfoot, "Fenómenos de Transporte", Ed. Español, Mc Graw-Hill Co., 1982, Cap. 17.

- 21.- Donald Q. Kern, "Procesos de Transferencia de Calor", Edición en Español, Cia. Edit. Continental S. A., México 1970, Caps. 11 y 18,.
- 22.- P. Trambouze, H. Van Landeghen, J. P. Wauquer, "Chemical Reactors", Institut Francais du Pétrole Publications, 1988, Cap. 8.
- 23.- Lionel Marks, "Mechanical Engineer's Handbook", 8ª Edición, Vol. I, Mc Graw-Hill Co., USA 1982, Caps. 3, 4 y 6.
- 24.- Ingalco Handbook, "Manual del Gabinete de Niebla Salina", Industrias Químicas Ingalco, Buenos Aires Argentina 1988.
- 25.- L. L. Sheir, "Corrosion Control", Vol 2, Butterworth and Co. Ltd., Londres 1979 Cap. 20.
- 26.- A. Kiseliiov, M. Krashnov, y G. Marakenko, "Problemas sobre Ecuaciones Diferenciales", Edit. Latinoamericana S. A., 1987, Cap. 14 y 18.
- 27.- Necati Ozisik, "Transferencia de Calor", Ed. Español, Mc Graw-Hill Latinoamericana, Colombia 1975, Caps. 8, 9, 10 y 11.

- 28.- "The Electric Heaters Handbook", Omega Engineers Co., Vol 28, USA 1992.
- 29.- Rev. "Fluid Movers", Jay Matler & The Staff of Chem. Engineers, "Selecting Fans and Blowers, Mc Graw-Hill Co., USA 1979, Section II, Pgs. 92-106.
- 30.- Ferdinand Rodríguez, "Principios de los Sistemas Poliméricos", Ed. Español, Edit. El Manual Moderno S. A., México 1984, Cap. 5.
- 31.- Gardco Handbook, "Corrosion Test Chambers Salt Spray (Fog) and Humidity", Paul Gardner Company Inc. , Florida USA 1986.

## *A P E N D I C E S*

### *\* SIMBOLOGIA USADA*

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>UNIDAD</u>
A :	Area de transferencia de calor	m <sup>2</sup>
A <sub>t</sub> :	Area de la tapa de la cámara	m <sup>2</sup>
A <sub>o</sub> :	Area en el orificio de entrada de aire (burbujeador)	m <sup>2</sup>
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> :	Constantes reales obtenida de la solución de Ec. Diferencial	
C <sub>0</sub> :	Concentración inicial de vapor de agua en aire	Kmol/m <sup>3</sup>
C <sub>f</sub> :	Concentración final de vapor de agua en aire	Kmol/m <sup>3</sup>
C <sub>s</sub> :	Concentración de saturación de vapor de agua en aire	Kmol/m <sup>3</sup>
C <sub>pi</sub> :	Capacidad calorífica de i a presión constante	J/Kg.°K
C <sub>vi</sub> :	Capacidad calorífica de i a volumen constante	J/Kg.°K
C <sub>d</sub> :	Coefficiente de descarga de la tobera	
d <sub>b</sub> :	Diámetro de la burbuja en la columna	m
d <sub>bo</sub> :	Diámetro de la burbuja en el orificio de entrada de aire	m
d <sub>B</sub> :	Diámetro de la burbuja para lograr 98%HR en la columna	m
d <sub>o</sub> :	Diámetro del orificio de entrada de aire (burbujeador)	m

<b>D</b>	: Constante usada para realizar cambio de variable	
<b>D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub></b>	: Diámetro de las tuberías de conexión al ventilador	m
<b>D<sub>c</sub></b>	: Diámetro de la columna de humidificación	m
<b>D<sub>G</sub></b>	: Difusividad aire - agua	m <sup>2</sup> /sg
<b>D<sub>tk</sub></b>	: Diámetro del tanque de salmuera	m
<b>D<sub>e</sub></b>	: Diámetro equivalente de sección transversal en la chaqueta	m
<b>D<sub>max</sub></b>	: Partícula de mayor tamaño en la población	mm
<b>D<sub>vm</sub></b>	: Mediana de volumen	mm
<b>D<sub>32</sub></b>	: Diámetro medio de Sauter	mm
<b>E</b>	: Constante usada para realizar cambio de variable	
<b>g</b>	: Aceleración de la gravedad	m <sup>2</sup> /sg
<b>Gr</b>	: Número de Grashof	
<b>h</b>	: Altura de la sección transversal de la chaqueta	m
<b>h<sub>C</sub></b>	: Altura de la columna de humidificación	m
<b>h<sub>o</sub></b>	: Coeficiente exterior de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> .K
<b>h<sub>i</sub></b>	: Coeficiente interior de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> .K
<b>h<sub>n</sub></b>	: Coeficiente de transferencia de calor referente al área n	W/m <sup>2</sup> .K
<b>h<sub>tk</sub></b>	: Altura del tanque de salmuera	m
<b>H<sub>opt</sub></b>	: Altura optima del agua en la columna	m
<b>H<sub>f</sub></b>	: Pérdidas por fricción en el transporte de un fluido	m
<b>H<sub>p</sub></b>	: Potencia del compresor de tipo centrífugo	HP
<b>% HR</b>	: Porcentaje de humedad relativa	



$\kappa$ :	Conductividad térmica	W/m.°K
$l$ :	Longitud de la sección transversal de la chaqueta	m
$L_R$ :	Longitud de la resistencia eléctrica	m
$L_{prom}$ :	Longitud promedio	m
$m_A$ :	Masa del agua en la chaqueta	kg
$m_C$ :	Masa del aire en la cámara	kg
$m_{aire}$ :	Flujo Másico del aire que ingresa a la chaqueta	kg/sg
$Nu.$ :	Número de Nusselt	
$P_{abs\ i}$ :	Presión absoluta en el punto i	N/m <sup>2</sup>
$P_{vsat}$ :	Presión de Vapor saturado	N/m <sup>2</sup>
$Pr$ :	Número de Prandtl	
Pot Resist:	Potencia de la resistencia	W
$P_{vent}$ :	Potencia del ventilador	W
$q_{aire}$ :	Flujo del aire que ingresa a la columna	m <sup>3</sup> /sg
$q_1$ :	Flujo del aire que ingresa al compresor	pie <sup>3</sup> /sg
$q_{salmuera}$ :	Flujo de salmuera recolectado	ml/hr
$Q_{Go}$ :	Flujo volumétrico del aire	m <sup>3</sup> /sg
$Q_{Re}$ :	Calor proporcionado por la resistencia	W
$Q_i$ :	Calor transferido de un medio i a otro	W
$Q_N$ :	Calor neto necesario para mantener la cámara a 35 °C	W
$Q_{pulv}$ :	Calor dado a la solución pulverizada	W
$Q_{vaporiz}$ :	Calor dado al flujo vaporizado	W

$Q_{neces}$ :	Calor necesario para calentar el aire a $T_1 = 54\text{ }^\circ\text{C}$	W
$Q_f$ :	Caudal del fluido (aire)	$\text{m}^3/\text{sg}$
$R$ :	Constante Universal de los Gases	
$Re$ :	Número de Reynolds	
$Re_o$ :	Número de Reynolds en el orificio	
$Re_i$ :	Número de Reynolds en el punto i	
$t$ :	Tiempo	sg
$t_f$ :	Tiempo en que la burbuja alcanza 98%HR	sg
$t_c$ :	Tiempo de calentamiento en la columna	sg
$T$ :	Temperatura del líquido	$^\circ\text{C}$
$T_{amb}$ :	Temperatura del medio ambiente	$^\circ\text{C}$
$T_w$ :	Temperatura de la pared	$^\circ\text{C}$
$T_A$ :	Temperatura del agua en la chaqueta	$^\circ\text{C}$
$T_C$ :	Temperatura del aire que ingresa a la cámara	$^\circ\text{C}$
$U_i$ :	Coficiente global de transferencia de calor en i	$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$
$V_o$ :	Velocidad del aire en el orificio	$\text{m}/\text{sg}$
$V_t$ :	Velocidad de ascensión de la burbuja en la columna	$\text{m}/\text{sg}$
$x$ :	Espesor de la pared de la cámara	m
$x'$ :	Espesor de la pared de aislante	m
$x_1, x_2$ :	Constantes obtenidas de la solución de una Ec. Difer.	
$Y$ :	Coficiente isoentrópico de la tobera	
$z$ :	Altura relativa en un Balance de Energía	m

$\alpha$  : Difusividad térmica

$\beta$  : Coeficiente de expansión volumétrica

$\delta$  : Valor numérico de la relación adimensional  $d/D$

$\gamma$  : Relación  $C_p/C_v$  del aire

$\varepsilon$  : Valor numérico de la relación adimensional :  $[(1 - \delta^4)]^{-0.5}$

$\lambda$  : Coeficiente de pérdidas primarias

$\mu$  : Viscosidad dinámica de un fluido Kg/m.sg

$\nu$  : Viscosidad cinemática de un fluido m<sup>2</sup>/sg

$\pi$  : Constante numérica  $Pi = 3.141592\dots$

$\rho$  : Densidad de un fluido Kg/m<sup>3</sup>

$\sigma$  : Tensión superficial N/m<sup>2</sup>

$L$  : Coeficiente de pérdidas secundarias

$n$  : Constante obtenida de tablas para Ec. 01

$e$  : Constante numérica de Neper = 2.71828....

$\zeta$  : Constante obtenida de tablas para Ec. 01

L : Líquido

G : Gas

o : Orificio

0 : Inicio

f : Final

**S : Saturación**

**i : Punto o elemento i**

**1, 2, 3, Punto, tramo, segmento**

**1, 2 Entrada , salida**

**\* TABLAS Y FIGURAS SOBRE LAS CORRIDAS  
DE PRUEBA USANDO LA COLUMNA PROTO-  
TIPO DE HUMIDIFICACION.**

**TABLA N° 1**

**EFICIENCIA DE LA RESISTENCIA ELECTRICA USADA EN LA COLUMNA DE HUMIDIFICACION**

FECHA CORRIDA	ALTURA LIQ. COLUMNA (m)	MASA DE AGUA (Kg)	TEMP. INICIAL (°C)	TEMP. FINAL (°C)	TIEMPO CALENTAM. (min)	CALOR RESIST. (W)	CALOR NECES. (W)	EFICIENCIA RESIST. (%)	
22-Abr-99	0.37	10.54	25.50	43.30	28.98	400.00	451.94	112.98	VD
7-May-99	0.37	10.54	25.00	43.30	33.00	400.00	408.03	102.01	VD
24-Jun-99	0.37	10.57	20.00	48.90	60.00	400.00	355.37	88.84	
25-Jun-99	0.37	10.49	20.50	46.10	49.20	400.00	380.77	95.19	
30-Jun-99	0.38	10.89	20.50	43.30	49.20	400.00	352.10	88.02	
2-Jul-99	0.38	10.74	20.00	43.30	NR	400.00	NR	NR	
3-Jul-99	0.37	10.60	20.00	43.30	40.98	400.00	420.62	105.16	VD
7-Jul-99	0.37	10.60	21.00	46.10	57.00	400.00	325.77	81.44	
5-Ago-99	0.37	10.46	18.00	46.10	57.00	400.00	359.78	89.94	
9-Ago-99	0.38	10.89	19.00	46.10	55.20	400.00	373.01	93.25	
11-Ago-99	0.38	10.89	19.00	43.30	55.20	400.00	334.47	83.62	
19-Ago-99	0.38	10.89	19.00	43.30	43.20	400.00	427.38	106.85	VD
20-Ago-99	0.39	11.17	19.00	43.30	51.00	400.00	371.54	92.89	
21-Ago-99	0.39	11.03	19.00	46.10	49.20	400.00	424.01	106.00	VD
<b>VALORES PROMEDIO OBTENIDOS</b>					<b>54.23</b>	<b>400.00</b>	<b>356.60</b>	<b>89.15</b>	

TABLA N° 2

**RECOLECTADOS OBTENIDOS DE SOLUCION PULVERIZADA**  
**EN LA CAMARA DE NIEBLA**

FECHA CORRIDA	PRESION COLUMNA (Psi)	TEMP. COLUMNA (°C)	TIEMPO CORRIDA (hr)	COLECTADOS		COLECTADOS		COLECTADOS PROM. (mL/hr)	
				1 (mL)	2 (mL)	1 (mL/hr)	2 (mL/hr)		
15-Oct-99	5.00	46.10	2.20	0.60	0.90	0.27	0.41	0.34	
19-Oct-99	5.00	46.10	1.75	0.40	0.70	0.23	0.40	0.31	
21-Oct-99	5.00	46.10	1.25	0.20	0.30	0.16	0.24	0.20	VD
3-Nov-99	5.00	46.10	2.50	0.60	1.10	0.24	0.44	0.34	
10-Nov-99	5.00	46.10	2.00	0.50	0.80	0.25	0.40	0.33	
7-May-99	10.00	43.30	6.42	1.30	1.30	0.20	0.20	0.20	VD
30-Jun-99	10.00	46.10	4.63	1.00	1.40	0.22	0.30	0.26	VD
2-Jul-99	10.00	43.30	4.03	1.30	1.60	0.32	0.40	0.36	
5-Jul-99	10.00	43.30	4.10	1.40	1.60	0.34	0.39	0.37	
11-Ago-99	10.00	43.30	2.60	1.10	1.80	0.42	0.69	0.56	
18-Ago-99	10.00	43.30	4.08	1.40	1.60	0.34	0.39	0.37	
19-Ago-99	10.00	43.30	2.65	0.60	0.90	0.23	0.34	0.28	
20-Ago-99	10.00	43.30	4.22	1.40	1.60	0.33	0.38	0.36	
11-May-99	15.00	43.30	4.17	0.50	1.40	0.12	0.34	0.23	VD
24-May-99	15.00	48.90	4.03	1.10	1.50	0.27	0.37	0.32	
25-Jun-99	15.00	46.10	4.15	0.90	1.30	0.22	0.31	0.27	VD
7-Jul-99	15.00	46.10	4.33	2.00	2.50	0.46	0.58	0.52	
5-Ago-99	15.00	46.10	2.37	1.00	1.40	0.42	0.59	0.51	
9-Ago-99	15.00	46.10	3.30	1.40	1.80	0.42	0.55	0.48	
21-Ago-99	15.00	46.10	3.33	0.90	1.20	0.27	0.36	0.32	
VALORES PROMEDIO OBTENIDOS					5 Psi	0.25	0.41	0.330	
					10 Psi	0.33	0.43	0.382	
					15 Psi	0.37	0.49	0.430	

**TABLA N° 3**

**GASTOS EN LA COLUMNA DE HUMIDIFICACION POR EFECTO DE LA PULVERIZACION**

FECHA CORRIDA	PRESION COLUMNA (Psi)	TEMP. COLUMNA (°C)	TIEMPO CORRIDA (hr)	DESCENSO ALTURA (mm)	GASTO TOTAL (mL)	GASTO HORARIO (mL/hr)	
15-Oct-99	5.00	46.10	2.20	1.50	42.98	19.54	VD
19-Oct-99	5.00	46.10	1.75	2.50	71.63	40.93	
21-Oct-99	5.00	46.10	1.25	1.00	28.65	22.92	
3-Nov-99	5.00	46.10	2.50	2.00	57.30	22.92	
10-Nov-99	5.00	46.10	2.00	1.50	42.98	21.49	
7-May-99	10.00	43.30	6.42	5.00	143.26	22.31	VD
30-Jun-99	10.00	46.10	4.63	4.00	114.61	24.75	
2-Jul-99	10.00	43.30	4.03	3.00	85.96	21.33	
5-Jul-99	10.00	43.30	4.10	3.50	100.28	24.46	
11-Ago-99	10.00	43.30	2.60	1.00	28.65	11.02	
18-Ago-99	10.00	43.30	4.08	3.00	85.96	21.07	
19-Ago-99	10.00	43.30	2.65	NR	NR	NR	
20-Ago-99	10.00	43.30	4.22	4.00	114.61	27.16	
11-May-99	15.00	43.30	4.17	3.50	100.28	24.05	
24-May-99	15.00	48.90	4.03	3.00	85.96	21.33	
25-Jun-99	15.00	46.10	4.15	NR	NR	NR	
7-Jul-99	15.00	46.10	4.33	3.50	100.28	23.16	
5-Ago-99	15.00	46.10	2.37	2.50	71.63	30.22	
9-Ago-99	15.00	46.10	3.30	3.00	85.96	26.05	
21-Ago-99	15.00	46.10	3.33	3.00	85.96	25.81	
<b>VALORES PROMEDIO OBTENIDOS</b>				<b>5 Psi</b>	<b>42.98</b>	<b>21.72</b>	
				<b>10 Psi</b>	<b>107.45</b>	<b>23.51</b>	
				<b>15 Psi</b>	<b>88.34</b>	<b>25.10</b>	



**TABLA N° 4**

**FLUJO DE AIRE QUE INGRESA A LA COLUMNA  
DE HUMIDIFICACION**

<b>FECHA CORRIDA</b>	<b>PRESION COLUMNA (Psi)</b>	<b>TEMP. COLUMNA (°C)</b>	<b>TIEMPO CORRIDA (hr)</b>	<b>FLUJO DE AIRE (pie3/hr)</b>
15-Oct-99	5.00	46.10	2.20	8.70
19-Oct-99	5.00	46.10	1.75	9.20
21-Oct-99	5.00	46.10	1.25	8.50
3-Nov-99	5.00	46.10	2.50	8.70
10-Nov-99	5.00	46.10	2.00	9.00
7-May-99	10.00	43.30	6.42	NR
30-Jun-99	10.00	46.10	4.63	12.90
2-Jul-99	10.00	43.30	4.03	11.70
5-Jul-99	10.00	43.30	4.10	12.40
11-Ago-99	10.00	43.30	2.60	11.20
18-Ago-99	10.00	43.30	4.08	10.20
19-Ago-99	10.00	43.30	2.65	9.30
20-Ago-99	10.00	43.30	4.22	9.00
11-May-99	15.00	43.30	4.17	NR
24-May-99	15.00	48.90	4.03	12.10
25-Jun-99	15.00	46.10	4.15	13.20
7-Jul-99	15.00	46.10	4.33	14.70
5-Ago-99	15.00	46.10	2.37	12.60
9-Ago-99	15.00	46.10	3.30	12.90
21-Ago-99	15.00	46.10	3.33	12.80
<b>VALORES PROMEDIO OBTENIDOS</b>			<b>5 Psi</b>	<b>8.82</b>
			<b>10 Psi</b>	<b>10.96</b>
			<b>15 Psi</b>	<b>13.05</b>

**TABLA N° 5**

**CONSUMO DE SOLUCION PULVERIZADA EN  
LA CAMARA DE NIEBLA**

FECHA CORRIDA	PRESION COLUMNA (Psi)	TEMP. COLUMNA (°C)	VOLUMEN PULVERIZADO (mL/hr)
3-Nov-99	5.00	46.10	1320.00
10-Nov-99	5.00	46.10	1300.00
6-Dic-99	5.00	46.10	1340.00
9-Dic-99	5.00	46.10	1280.00
11-Ago-99	10.00	43.30	1560.00
18-Ago-99	10.00	43.30	1560.00
19-Ago-99	10.00	43.30	1680.00
20-Ago-99	10.00	43.30	1640.00
5-Ago-99	15.00	46.10	1840.00
9-Ago-99	15.00	46.10	1980.00
21-Ago-99	15.00	46.10	1980.00
6-Dic-99	15.00	46.10	1840.00
<b>VALORES PROMEDIO OBTENIDOS</b>		<b>5 Psi</b>	<b>1310.00</b>
		<b>10 Psi</b>	<b>1610.00</b>
		<b>15 Psi</b>	<b>1910.00</b>

**TABLA N° 6**

**HUMEDAD RELATIVA EN LA CAMARA**

N° LECTURA (A T° @ 20C)	TEMP. BULBO SECO (°C)	TEMP. BULBO HUMEDO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (% HR)
1	21.00	21.00	100.00
2	21.00	20.00	95.00
3	21.00	20.50	97.00
4	20.00	19.00	94.00
5	20.00	19.50	96.00
6	20.50	19.50	94.50
<b>VALOR PROMEDIO OBTENIDO</b>			<b>95.30</b>

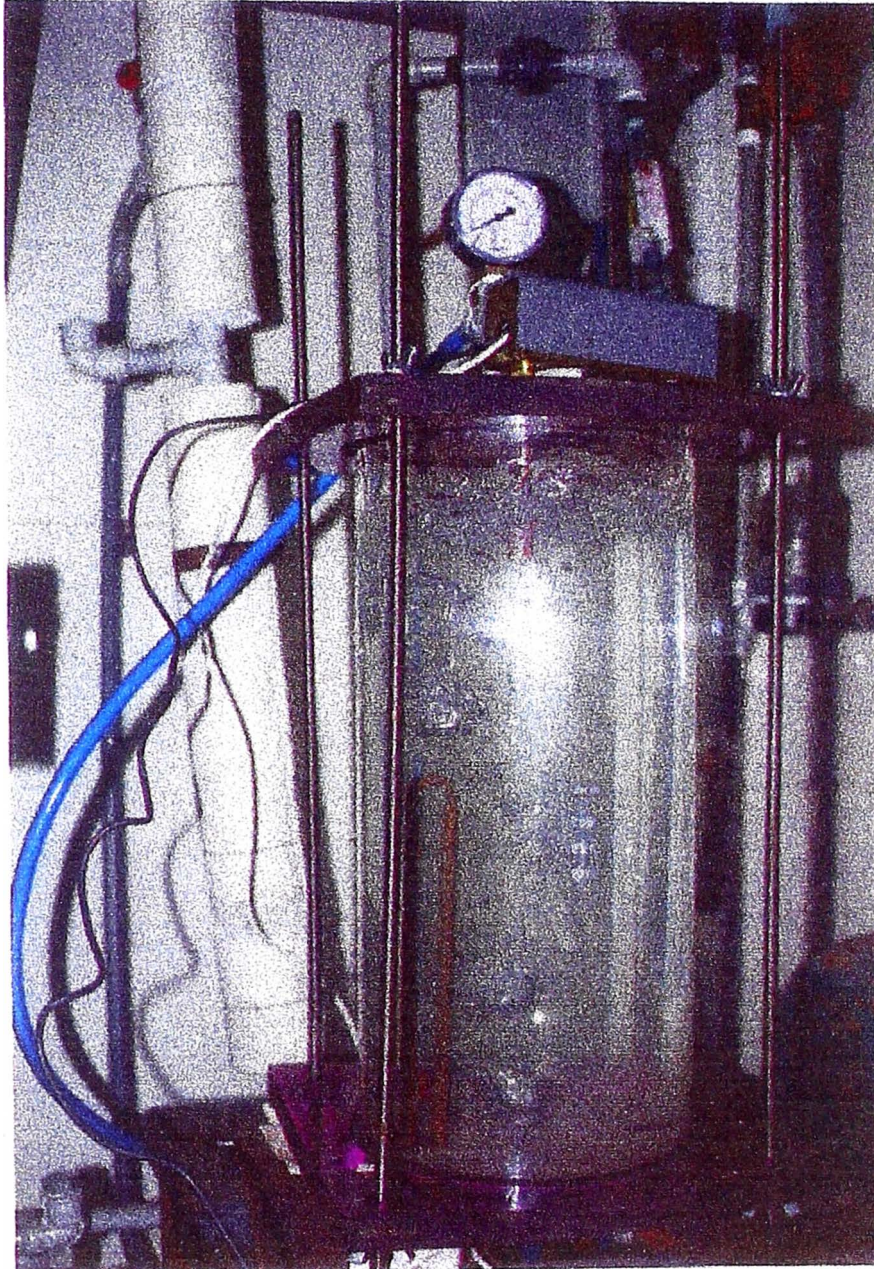
VD

**TABLA N° 7**

**DIAMETRO EQUIVALENTE DE LAS BURBUJAS EN LA COLUMNA DE HUMIDIFICACION**

BURBUJA N°	P = 5 Psi		P = 10 Psi		P = 15 Psi	
	DIAM. REAL (mm)	DIAM. EQUIV. (mm)	DIAM. REAL (mm)	DIAM. EQUIV. (mm)	DIAM. REAL (mm)	DIAM. EQUIV. (mm)
1	12.5,8.5,14.5	11.55	21.0,31.5,24.5	25.31*	9.5,7.15,4.8	6.87
2	15.2,8.3,7.5	9.82	21.0,35.0,17.5	26.21*	7.15,3.6,4.8	4.96
3	7.2,8.5,15.5	9.83	28.0,38.5,31.5	26.62*	4.8,2.4,2.4	3.00
4	7.0,5.25,5.25	5.78	7.0,5.25,5.25	10.50	26.2,21.5,16.7	21.09*
5	5.25,7.0,3.5	5.05	5.25,7.0,3.5	5.78	7.15,8.34,4.8	6.57
6	3.5,7.0,5.5	5.13	3.5,7.0,5.25	5.05	7.15,11.9,7.15	8.48
7	NR	NR	8.75,5.25,5.25	6.22	38.1,11.9,14.3	18.65*
8	NR	NR	NR	NR	26.2,26.2,2.4	11.79*
<b>DIAM. EQUIV. PROMEDIO</b>		<b>7.418</b>		<b>6.608</b>		<b>5.638</b>

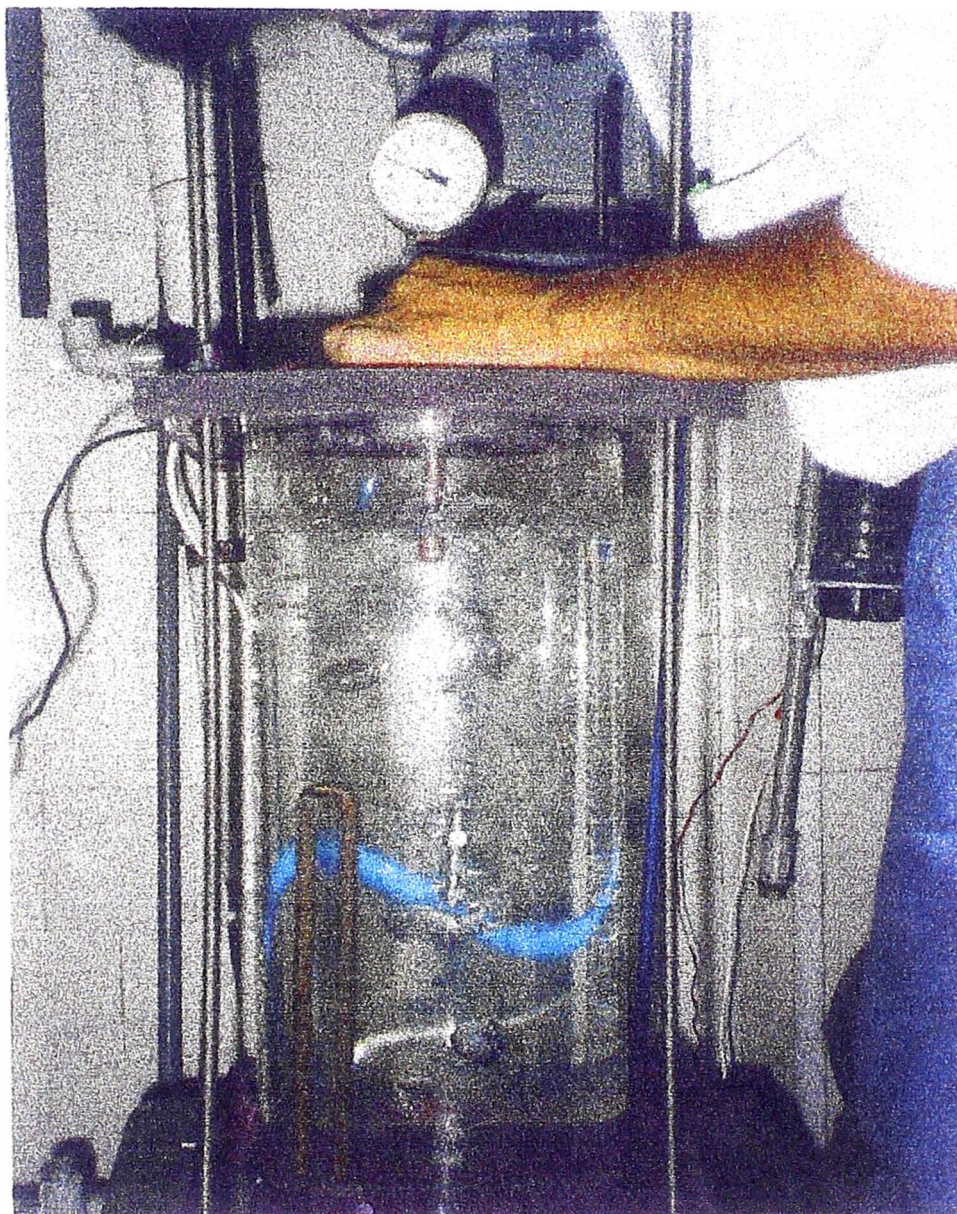
- NOTAS :** 1) PARA EL CALCULO DEL DIAM. EQUIVALENTE DE LAS BURBUJAS SE REALIZO LA MEDIDA DE 03 DIAMETROS EN FOTOGRAFIAS AMPLIADAS (PARA CADA PRESION), LUEGO SE HACE LA CONVERSION ESCALAR ENTRE LO LEIDO EN LA FOTO Y LO REAL, Y FINALMENTE SE OBTIENE LA MEDIA GEOMETRICA DE LOS DIAMETROS PARA OBTENER EL EQUIV.  
 2) LAS BURBUJAS NUMERADAS SE ENCUENTRAN UBICADAS EN LAS FOTOS  
 3) N\* : VALOR DESCARTADO PARA EL CALCULO  
 4) NR = VALOR NO REGISTRADO ; VD = VALOR DESCARTADO



**Figura N° 1**  
**Burbujas producidas en la columna a  $P = 5$  psi.**



**Figura N° 2**  
**Burbujas producidas en la columna a  $P = 10$  psi.**



**Figura N° 3**

**Burbujas producidas en la columna a  $P = 15$  psi.**

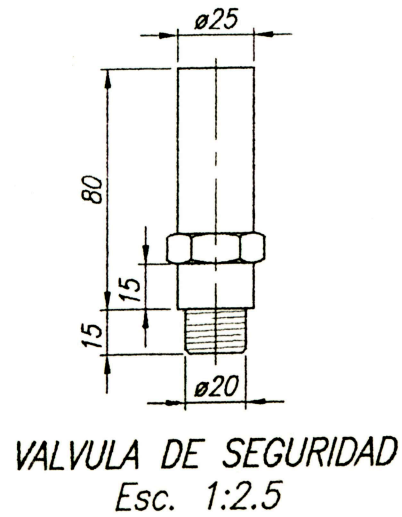
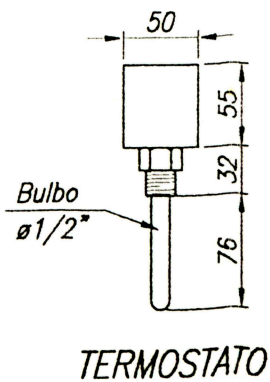
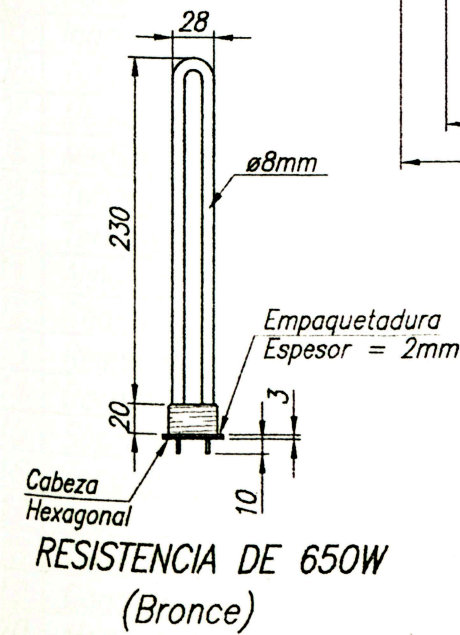
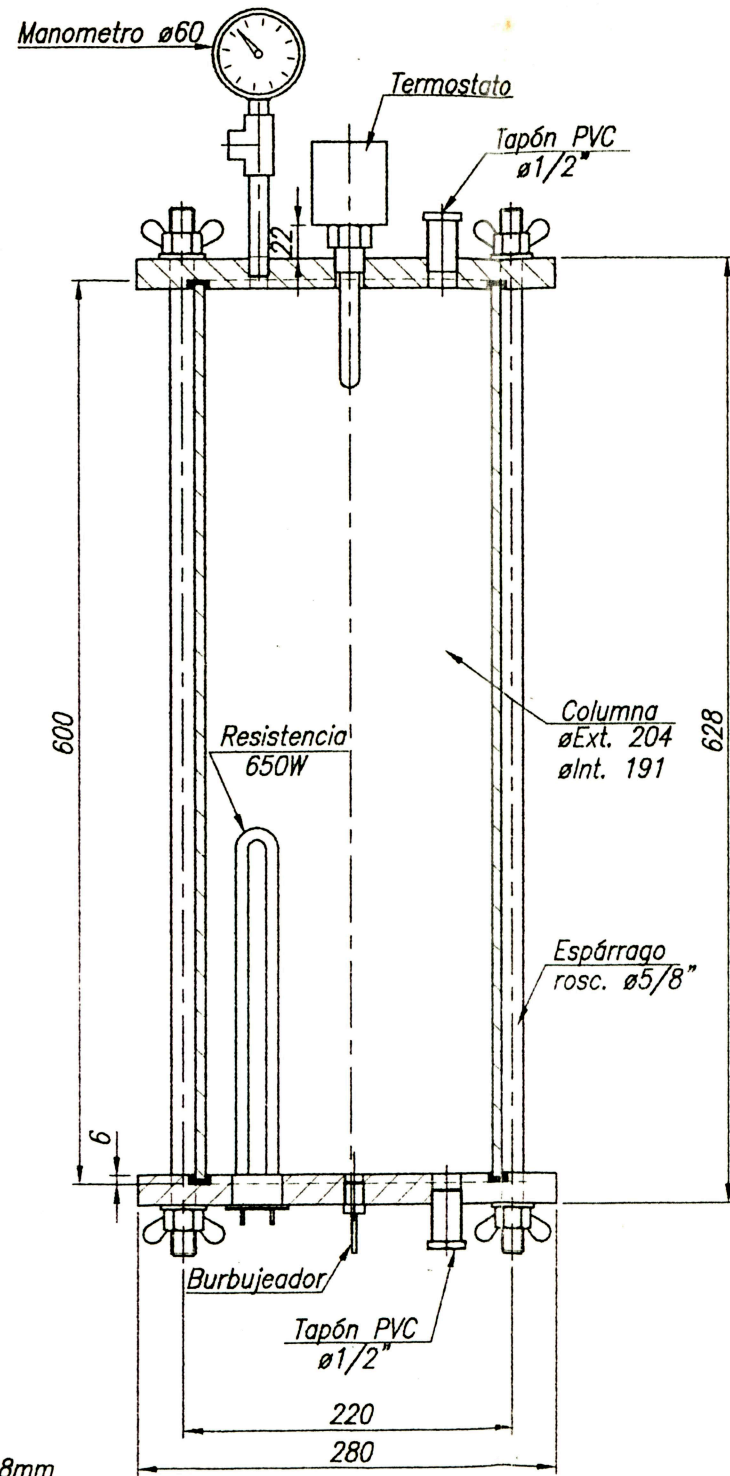


**Figura N° 4**  
**Burbujas producidas en el orificio de entrada de aire.**

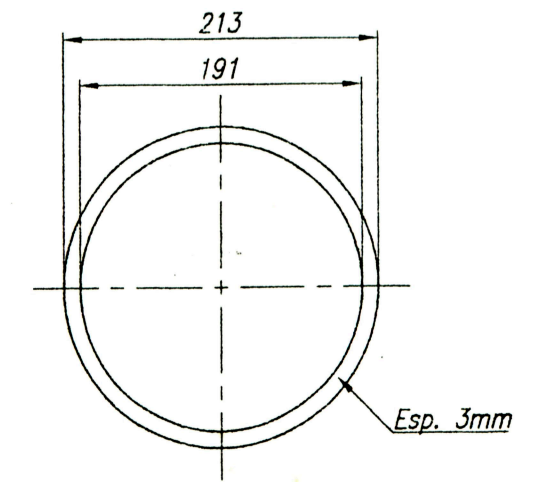
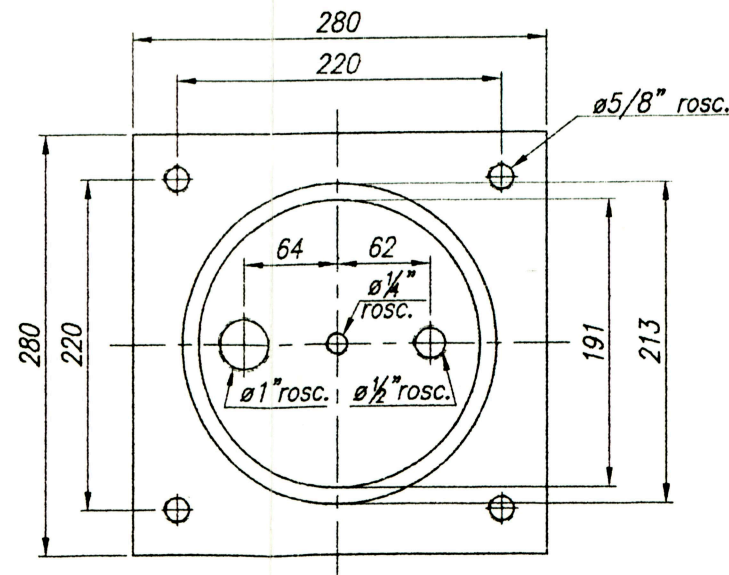
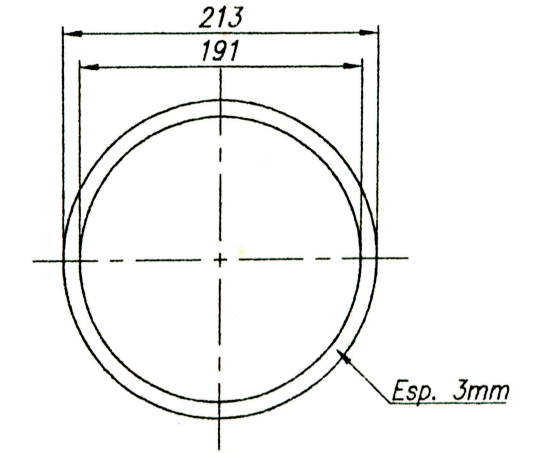
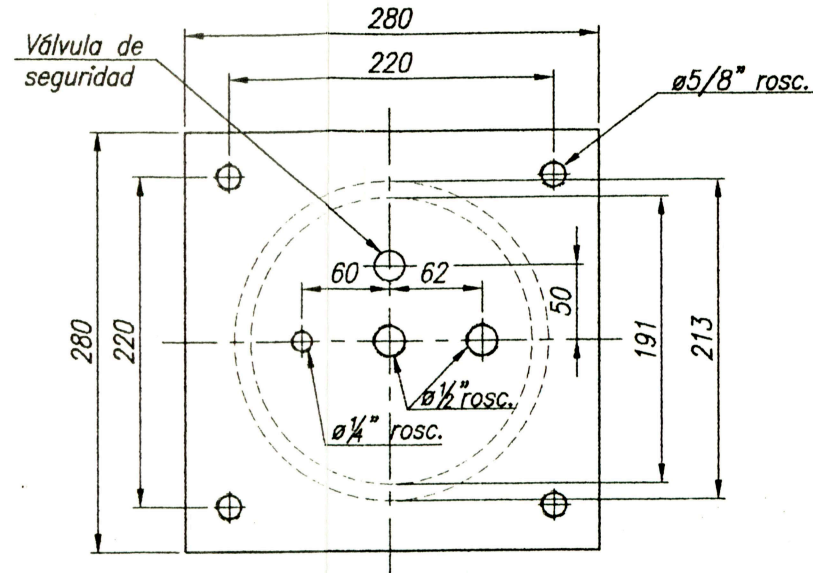
**\* *DIAGRAMAS DE DISEÑO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS Y SISTEMAS DE CONTROL Y CALEFACCION***



# COLUMNA DE HUMIDIFICACION



## DETALLE DE TAPAS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

CAMARA DE PULVERIZACION SALINA

COLUMNA DE HUMIDIFICACION

FECHA: 29/11/99

ESCALA: 1:5

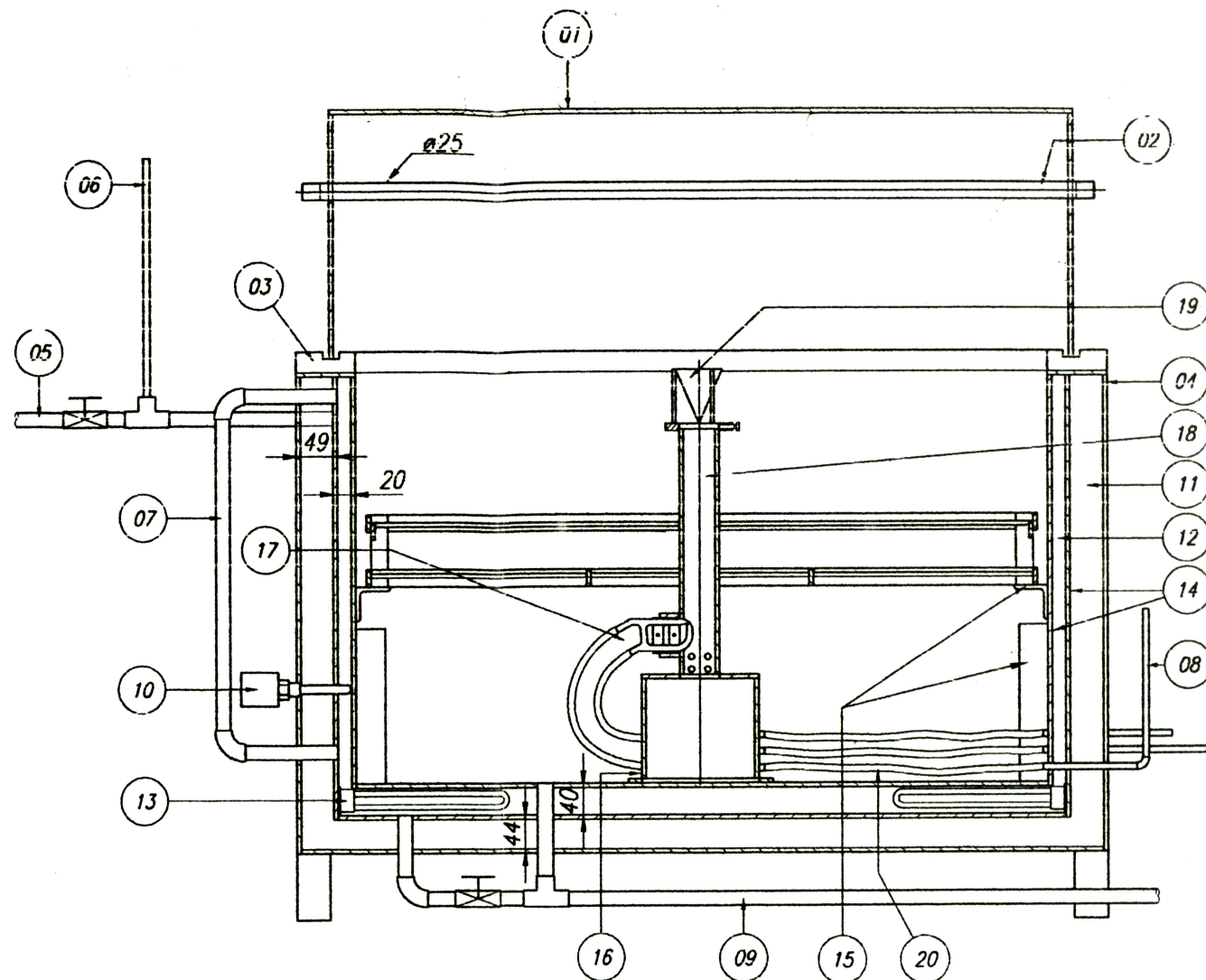
PLANO: 001

DISEÑADO POR: M. ALVARADO / R. GOMEZ

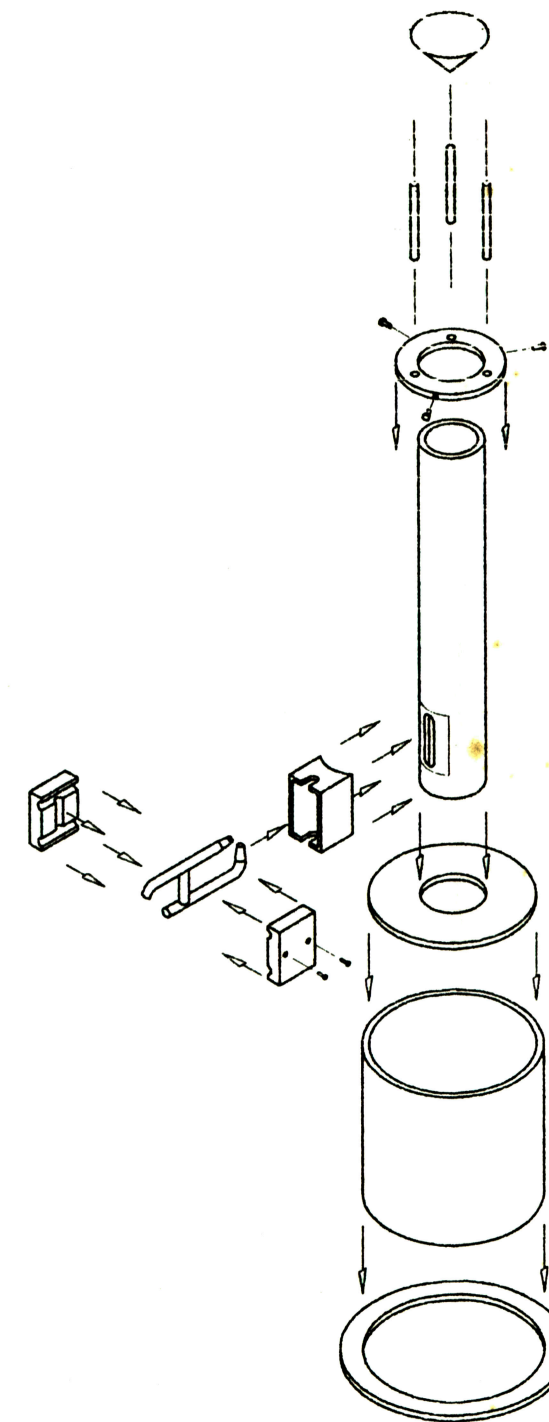
DIBUJADO POR: P. ZEGARRA

REV./APROBADO: ING. PEDRO PIZARRO S.

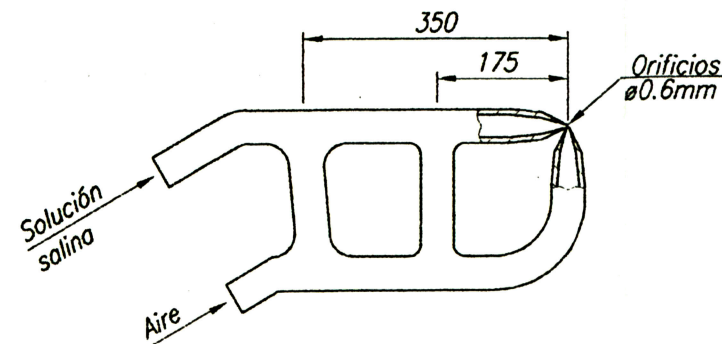
FIRMA:



CHAQUETA DE AGUA



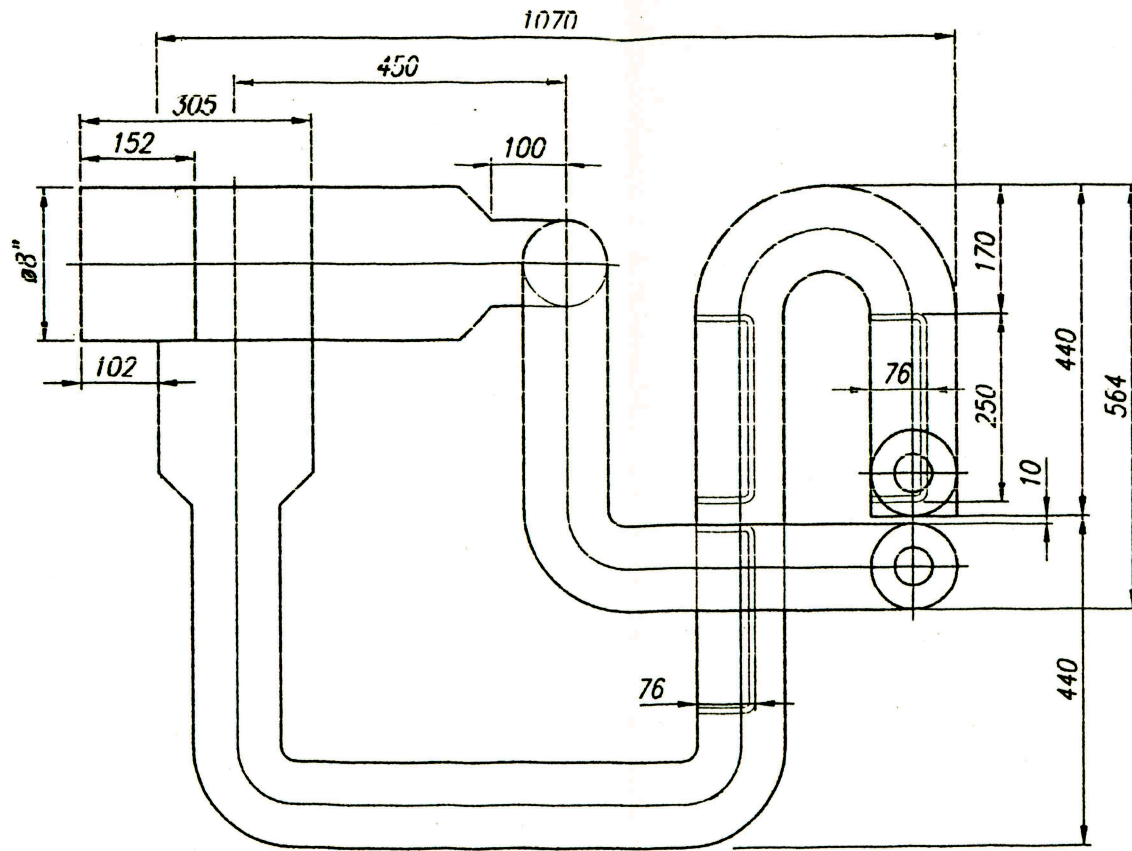
TORRE DE DISPERSION  
S/E



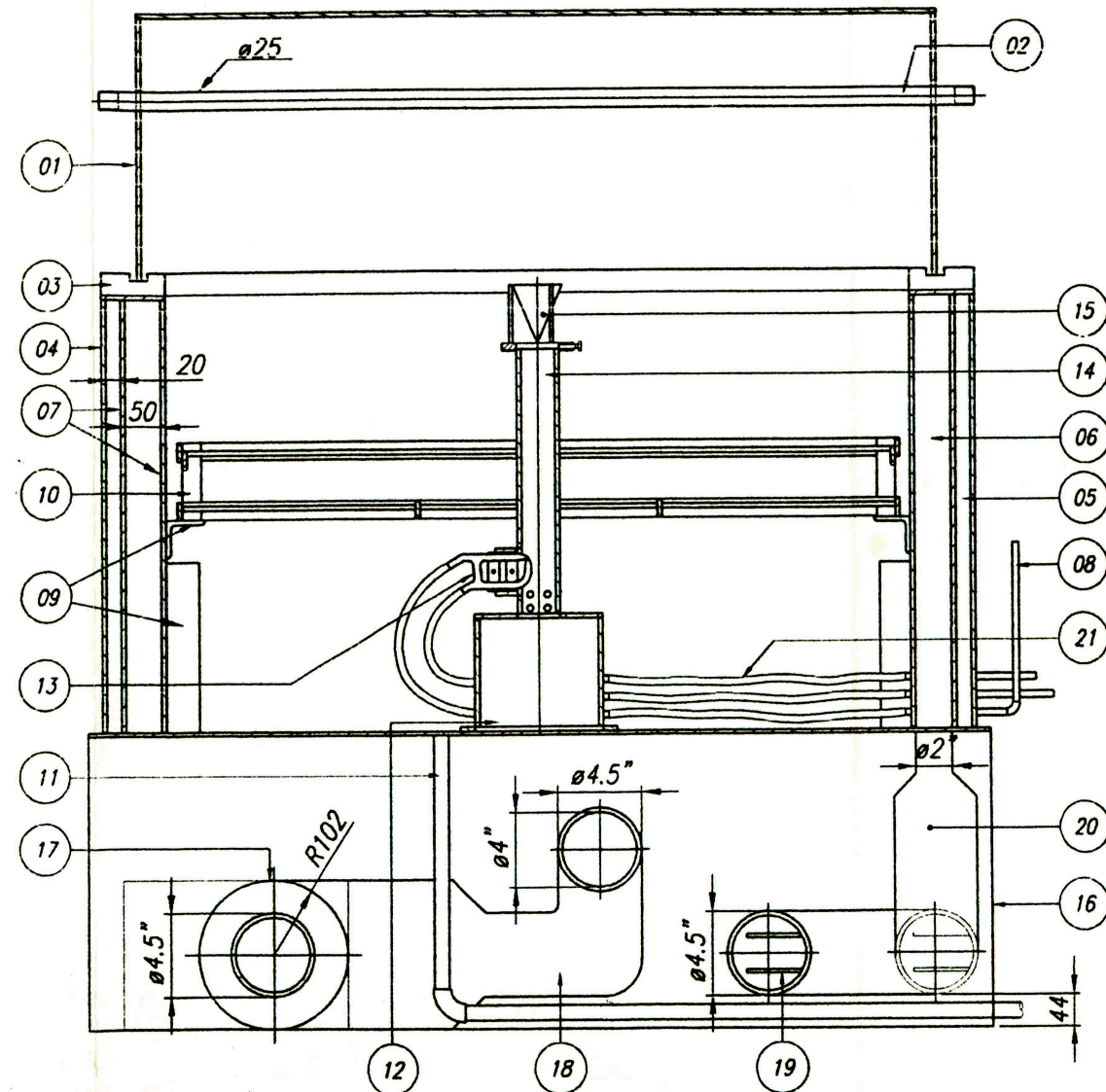
TOBERAS AIRE / SOLUCION SALINA  
Esc. 1:2

LEYENDA	
01	Tapa móvil transparente
02	Eje de apoyo de la tapa
03	Sello de agua
04	Pared externa
05	Ingreso de agua destilada
06	Tubería de venteo
07	Medidor de nivel de agua de la chaqueta
08	Medidor de nivel del tanque interno
09	Tubería de drenaje
10	Termostato
11	Aislante de lana mineral
12	Chaqueta de agua
13	Resistencias
14	Paredes interiores
15	Soportes para porta probetas
16	Tanque interno de solución salina
17	Toberas
18	Torre de dispersión
19	Cono de dispersión
20	Manqueras ø9mm

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA</b>			DISEÑADO POR: M. ALVARADO / R. GOMEZ
CAMARA DE PULVERIZACION SALINA			DIBUJADO POR: P. ZEGARRA
CHAQUETA DE AGUA (ALTERNATIVA 1)			REV./APROBADO: ING. PEDRO PIZARRO S.
FECHA: 29/11/99	ESCALA: 1:10	PLANO: 002	FIRMA:



SISTEMA DE CALENTAMIENTO  
VISTA DE PLANTA



CHAQUETA DE AIRE

LEYENDA	
01	Tapa móvil transparente
02	Eje de apoyo de la tapa
03	Sello de agua
04	Pared externa
05	Aislante de lana mineral
06	Espacio de aire
07	Pared interna
08	Nivel de tanque interno
09	Soportes
10	Porta probetas
11	Tubería de drenaje
12	Tanque de solución salina
13	Toberas
14	Torre de dispersión
15	Cono de dispersión
16	Pared de sistema de calefacción
17	Ventilador
18	Tuberías de ingreso de aire a la cámara
19	Resistencias long. total 16" c/u, $\phi 5/16"$
20	Tubería de salida de aire de la cámara
21	Manueras $\phi 9\text{mm}$

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

CAMARA DE PULVERIZACION SALINA

CHAQUETA DE AIRE (ALTERNATIVA 2)

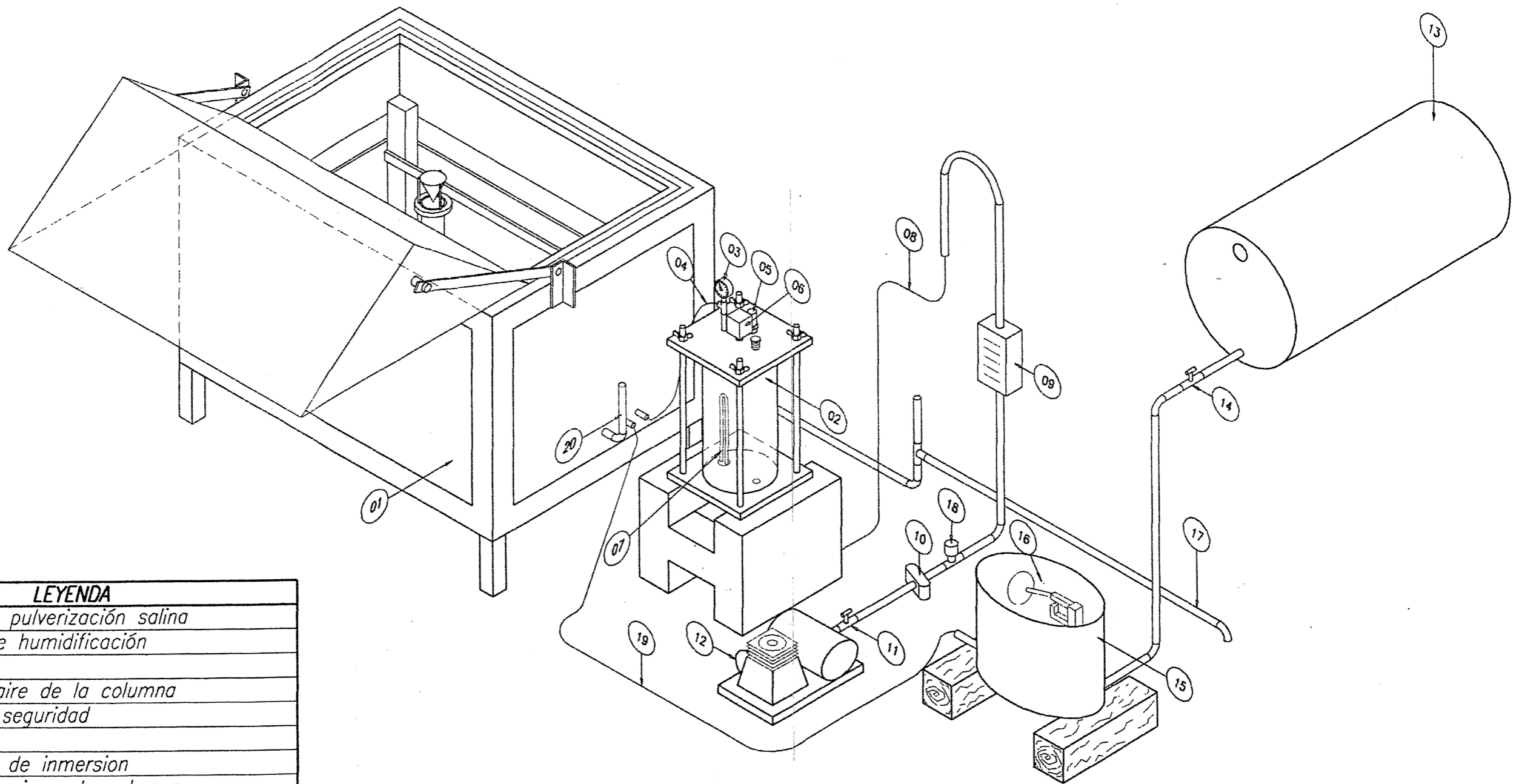
FECHA: 29/11/99 ESCALA: 1:10 PLANO: 003

DISEÑADO POR: M. ALVARADO / R. GOMEZ

DIBUJADO POR: P. ZEGARRA

REV./APROBADO: ING. PEDRO PIZARRO S.

FIRMA:



**LEYENDA**

01	Camara de pulverización salina
02	Columna de humidificación
03	Manometro
04	Salida de aire de la columna
05	Válvula de seguridad
06	Termostato
07	Resistencia de inmersión
08	Entrada de aire a la columna
09	Rotámetro
10	Filtro
11	Válvula de salida del compresor
12	Compresor
13	Tanque externo mayor de solución salina
14	Valvula de bola
15	Tanque externo menor de solución salina
16	Controlador de nivel tipo boya
17	Tuberias de drenaje
18	Válvula solenoide $\varnothing 1/2"$
19	Manguera $\varnothing 9\text{mm}$
20	Indicador de nivel del tanque interno

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**CAMARA DE PULVERIZACION SALINA**

DIAGRAMA ISOMETRICO GENERAL

FECHA: 29/11/99 ESCALA: 1:15 PLANO: 004

DISEÑADO POR: M. ALVARADO / R. GOMEZ

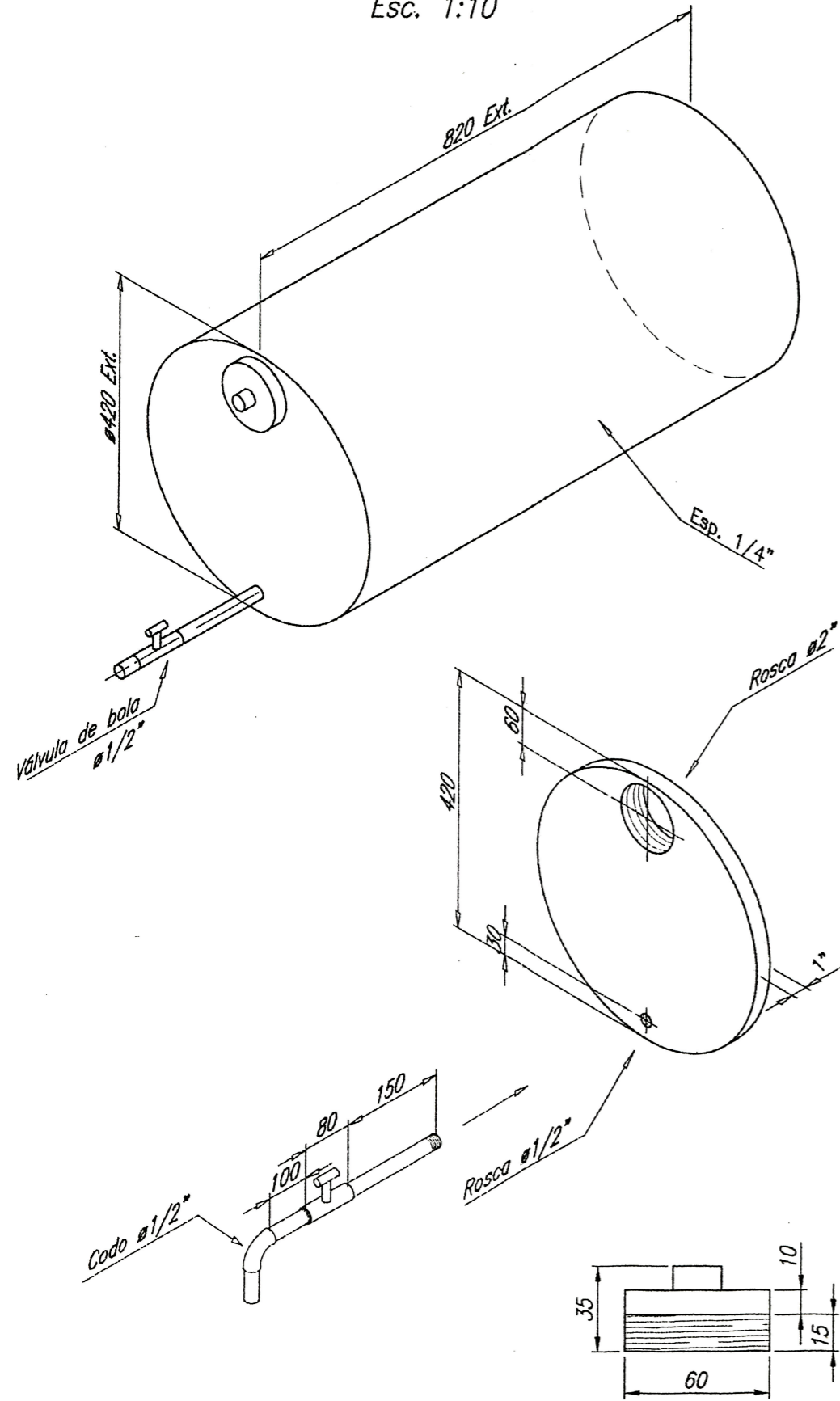
DIBUJADO POR: P. ZEGARRA

REV./APROBADO: ING. PEDRO PIZARRO S.

FIRMA:

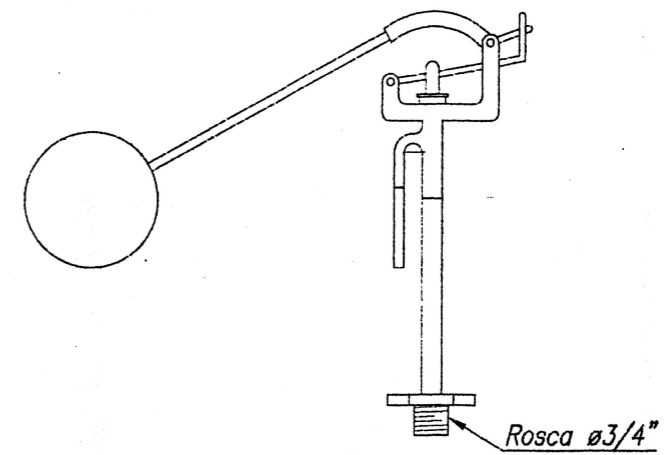
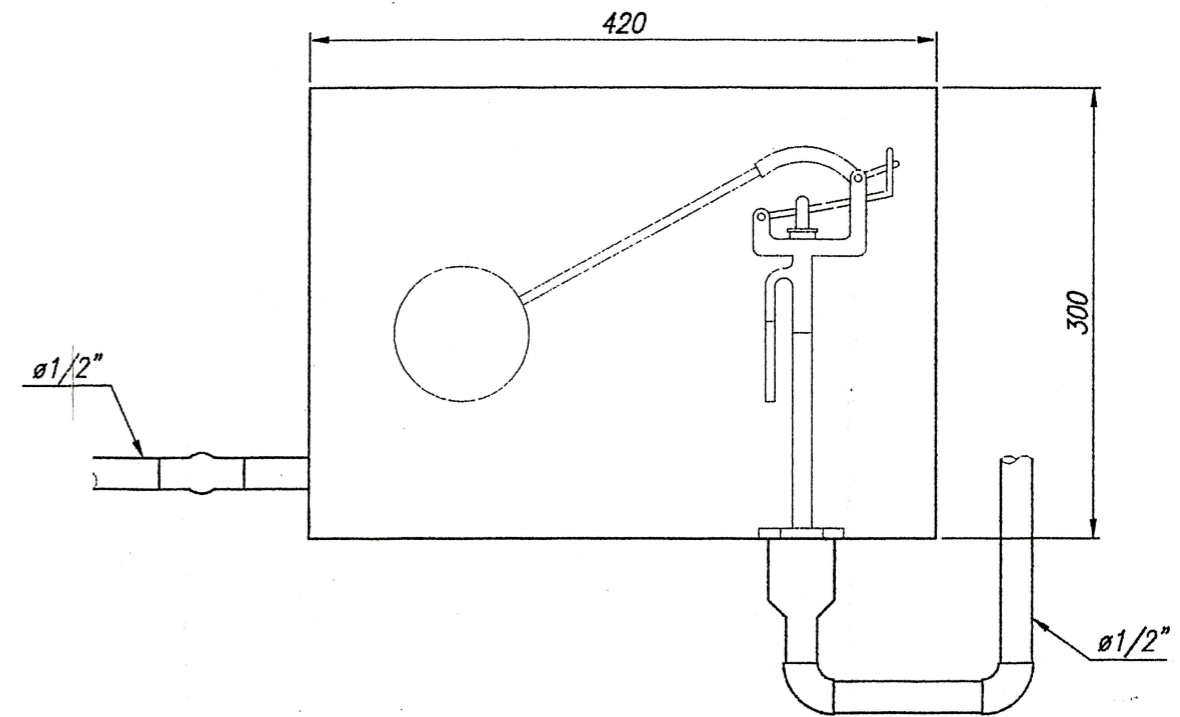
TANQUE EXTERNO MAYOR CERRADO

Esc. 1:10



TAPA  $\phi 2''$   
Esc. 1:2.5

TANQUE EXTERNO MENOR (Abierto)



CONTROLADOR DE NIVEL (Boya)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA			DISEÑADO POR: M. ALVARADO / R. GOMEZ
CAMARA DE PULVERIZACION SALINA			DIBUJADO POR: P. ZEGARRA
TANQUES DE ALIMENTACION DE SOLUCION SALINA			REV./APROBADO: ING. PEDRO PIZARRO S.
FECHA: 29/11/99	ESCALA: 1:5	PLANO: 005	FIRMA: