

3256

634.83  
D554  
1999  
←  
344

**FONDO NACIONAL DE DESARROLLO TECNOLOGICO Y PRODUCTIVO**

**FONTEC - CORFO**

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE PRODUCCION INDUSTRIAL DE**

**FITOPPLUS, UN REGULADOR HORMONAL NATURAL**

**Proyecto 97-12-24**

**Empresas DICTUC S.A. y BASF CHILE S.A.**

634.83  
D 554  
1999

**INFORME FINAL**

## A. RESUMEN EJECUTIVO

Nuestro País exporta una gran cantidad de uva de mesa, especialmente de las variedades apirénicas, como Sultanina y Flame Seedles. Éstas dependen absolutamente de la aplicación exógena a los racimos de una hormona vegetal, el ácido giberélico, GA<sub>3</sub>. Durante la ejecución del Proyecto FONDEF 2-50 se ha desarrollado un producto alternativo, FITOPLUS, el cual ha sido evaluado en diferentes predios a lo largo de Chile, presentando -en muchos casos- un comportamiento superior al GA<sub>3</sub> comercial. Este compuesto se produce a nivel piloto utilizando una tecnología relativamente nueva en el mundo occidental, el cultivo sobre sustrato sólido (CSS), el cual -sin embargo- es conocido en el Oriente desde hace siglos.

Este proyecto fue desarrollado con el propósito de hacer más atractivo el negocio de producir FITOPLUS en Chile, utilizando la tecnología del cultivo sobre sustrato sólido. Este proceso, fue desarrollado a nivel piloto dentro del marco del proyecto FONDEF referido anteriormente. El negocio presentaba elementos que lo hacían riesgoso; de entre éstos, los más importantes eran: algunas deficiencias técnicas relacionadas con el diseño y operación del biorreactor; evaluaciones de campo con FITOPLUS poco consistentes, aunque siempre mostrando un resultado igual o superior al GA<sub>3</sub> comercial.

El resultado más relevante de este proyecto es la solución de los problemas técnicos relacionados con el diseño y operación del biorreactor, que es el equipo clave en esta tecnología. Se elaboraron y evaluaron en nuestro reactor piloto nuevos sistemas de agitación y de control de la temperatura del lecho y de la contaminación. Estos sistemas implicaron realizar modificaciones mayores en el biorreactor, lo cual nos permitió evaluar apropiadamente los efectos de estas modificaciones en el aumento y repetibilidad del rendimiento. Aún cuando nuestra experiencia de varios años con esta tecnología nos muestra que estos aspectos son los principales responsables de los bajos rendimientos.

Los nuevos ensayos de campo, realizados en tres predios, no entregaron resultados concluyentes, pero se pudo comprobar que un manejo apropiado puede mejorar en forma considerable la calidad y productividad del predio. Para mejorar el conocimiento en este aspecto se debe desarrollar un proyecto de aplicación de FITOPLUS más extenso y controlado para realmente evaluar en forma estadísticamente significativa las diferencias con el GA<sub>3</sub> comercial.

Otro resultado relevante del proyecto, es que una evaluación económica actualizada muestra que la producción en Chile de FITOPLUS es un negocio bueno y de poco riesgo. En condiciones nominales presenta un TIR cercano al 50%, y en las condiciones más desfavorables (como un precio similar al GA<sub>3</sub> comercial o mayores costos de producción) el TIR siempre supera el 25%.

## **B. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **Introducción**

Durante los últimos años, Chile ha experimentado un auge significativo en la exportación de uva de mesa, especialmente de las variedades apirénicas -sin semilla-, como Sultanina y Flame Seedles. Éstas representan cerca del 70% de la superficie plantada para este fin, con un mercado de 350 USM\$. Estas variedades dependen absolutamente de la aplicación exógena a los racimos de una hormona vegetal, el ácido giberélico, GA<sub>3</sub>.

En el Proyecto FONDEF 2-50 se desarrolló un producto alternativo, FITOPLUS, que contiene una mezcla de giberelinas que presenta un comportamiento diferente, generalmente superior, a la giberelina comercial. Este compuesto se produce a nivel piloto por cultivo sobre sustrato sólido. Sin embargo, para llevar el proceso a escala industrial, se debe diseñar tanto el biorreactor como el proceso de producción. Además, se debe realizar una evaluación económica actualizada del negocio, considerando los últimos resultados de la aplicación de FITOPLUS en predios seleccionados, y los costos del diseño más detallado de la planta de producción.

En cuanto al proceso, específicamente se buscó mejorar la calidad del sustrato sólido, controlar la contaminación en forma más estricta, mejorar el sistema de agitación -para lograr una buena homogeneización del sustrato durante el cultivo- y se propuso mejorar el sistema de regulación de la temperatura del lecho. Adicionalmente, se consideró diseñar un reactor de tamaño industrial, más económico, más simple de operar y más fácil de construir que el que existe actualmente a escala piloto. Para el escalamiento a nivel industrial fue necesario también diseñar un sistema de alimentación, inoculación y humidificación del sustrato.

### **Metodología**

Para cubrir los objetivos propuestos en el Proyecto, se consideró el desarrollo en paralelo de tres aspectos fundamentales: producción, aplicación y comercialización. En el ámbito de la producción, se realizaron pruebas de producción y de control con el reactor piloto modificado, para evaluar las innovaciones propuestas y sentar las bases para el diseño del reactor industrial; en el ámbito de la aplicación, se analizaron las pruebas de campo realizadas en conjunto por el INIA/La Platina y BASF Chile; y en el ámbito comercial, se cuantificaron los beneficios económicos que implica para el productor el uso de Fitoplus, y se actualizó la evaluación económica para llevar el proceso a escala industrial, utilizando los últimos antecedentes técnicos generados en el Proyecto.

Los temas tratados durante la ejecución de este proyecto, en conformidad con los aspectos considerados, pueden resumirse en:

a) Producción

- Se estudió la composición utilizada en la preparación del substrato, con el objeto de que mantenga su estructura durante todo el cultivo.
- Se disminuyó sustancialmente la contaminación del lecho sólido, rediseñando y construyendo -en acero inoxidable- la porción del ducto de aire ubicada entre el filtro absoluto y el reactor, y cambiando el sello de goma existente entre la parte fija y la parte móvil del reactor por uno de "agua". Se incorporó un ionizador durante el proceso de esterilización inicial y radiación UV permanente sobre el aire de entrada.
- Se rediseñaron y construyeron los agitadores del reactor piloto, de tal forma de lograr una buena homogeneización del substrato (temperatura, humedad, nutrientes y biomasa) y no perjudicar el crecimiento y viabilidad del microorganismo. Se logró evitar las canalizaciones del flujo de aire que se producían con el antiguo sistema, al incorporar un brazo neumático que extrae las termocuplas del lecho durante el tiempo de incorporación de agua con nutrientes y de agitación.
- Se diseñó y construyó una escalera y pasillo de inspección, para aumentar la seguridad y facilitar el desplazamiento del operador. De esta forma, se consigue mejorar el procedimiento de carga manual del reactor, disminuyendo el riesgo de ingresar contaminación por esta vía aunque, sin duda, no es el procedimiento más adecuado y tampoco es aplicable a escala industrial.
- Se incorporó control automático al flujo de aire, lo que -sin duda- sirvió para simplificar la regulación de la temperatura y humedad del lecho sólido.
- Se agregaron estrategias de control avanzado en la regulación de la temperatura del lecho, disminuyendo el número de intervenciones por parte del operador.
- Se diseñó un reactor de tamaño industrial más simple de operar y construir que el reactor piloto disponible, así como el sistema de carga aséptico del reactor con el sólido extruído, su inoculación y humidificación uniforme.

b) Aplicación

- Se analizó el efecto de FITOPLUS en viñas de alto rendimiento y bajo condiciones de manejo controlado.
- Se estudiaron las condiciones de aplicación de FITOPLUS, y se establecieron las bondades e inconvenientes que tiene este producto sobre el disponible comercialmente.

c) Comercial

- Se realizó una evaluación económica actualizada del diseño de una planta industrial con tres reactores, donde se evidencia el buen negocio que puede significar la realización de la planta, aún con rendimientos de FITOPLUS inferiores a los considerados.

## C. METODOLOGIA Y PLAN DE TRABAJO

La metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto consideró el desarrollo de tres actividades fundamentales. En el ámbito de la **producción**, se realizaron pruebas de operación con el biorreactor piloto, y se evaluaron diversas innovaciones propuestas para su inclusión en el diseño de un biorreactor de tamaño industrial. En el ámbito de la **aplicación**, se analizaron los resultados de los últimos ensayos de campo realizados en conjunto con BASF Chile. En el ámbito **comercial**, se cuantificó más precisamente los beneficios económicos que implica para el productor el uso de FITOPLUS, y además se actualizó la evaluación económica utilizando los últimos antecedentes técnicos generados en el proyecto.

### I. Actividad PRODUCCION

Uno de los temas relacionados con la actividad de producción contempló el diseño de un biorreactor para Cultivos sobre Substrato Sólido (CSS) de tamaño industrial con capacidad para 2500Kg, más eficiente y económico que el actual biorreactor piloto de 200Kg de capacidad, perteneciente al Laboratorio de Fermentación Sólida de DICTUC S.A. (LFS/DICTUC). Este último fue diseñado y construido durante la ejecución del Proyecto FONDEF 2-50. Además, esta actividad consideró el diseño de un sistema industrial para el proceso de "Upstream", que comprende todas aquellas etapas previas al proceso CSS, tales como: la preparación del substrato (extrusión), su pretratamiento (enfriamiento, humidificación e inoculación) y su carga al biorreactor, todo lo cual se debe realizar en forma continua y aséptica. Finalmente, se consideró ejecutar diversas innovaciones para dar solución a los principales problemas asociados al diseño y operación del biorreactor. Las innovaciones propuestas estaban orientadas a: minimizar la contaminación, mejorar la homogeneización del lecho y definir una estrategia avanzada para el control de temperatura del lecho. Los resultados de estas evaluaciones permitieron mejorar el diseño del reactor industrial.

#### I.1 Diseño de un sistema industrial para la producción de Fitoplus.

En este informe se completa la información entregada en el Informe de Avance N°1, y se señalan algunas modificaciones con respecto a dicho informe. Estas tienen relación principalmente con el proceso de "upstream" y con el diseño del biorreactor CSS industrial, aunque se dan algunos lineamientos de diseño de la planta industrial.

El proyecto se diseñó para una planta de producción con una capacidad nominal de tres biorreactores de 2500Kg cada uno, y una capacidad máxima de cinco reactores. La evaluación económica considera la capacidad nominal.

##### *I.1.1 Configuración de la planta*

El proceso de fermentación se completa aproximadamente en 6 días, por lo que es lógico proyectar, para una planta con tres o cinco reactores, un sólo mecanismo productor de pellets y cargador (PPC). Cada reactor se carga con 2500Kg (6,5 m<sup>3</sup>), proceso que se

lleva a cabo aproximadamente en 3 horas. Por este motivo, después de cargar cada reactor, se dispone del tiempo suficiente para que el PPC pueda ser limpiado y preparado para la próxima producción. Lo anterior, sugiere que la configuración de la planta debe ser tal, que el sistema PPC sea fácilmente operable con todos los reactores. Para satisfacer este punto, se proyectó una planta con la siguiente configuración:

- Extrusor y depósito de materia prima, en el centro.
- Mecanismo transportador (MT), pivotante en la salida del extrusor.
- Los reactores están ubicados en una semicircunferencia de 6m de radio, descrita por la boca de descarga del MT, de tal manera que la boca de entrada de cada reactor coincida con la boca de salida del MT.
- En la planta de capacidad nominal, los tres reactores están separados con un ángulo de 90°. De esta manera queda espacio suficiente para las escaleras y plataformas de cada reactor.
- Un sistema de rieles para retirar el material ya fermentado. Para ello se utiliza una tolva montada en un carro.
- Cada reactor cuenta con su propio sistema de aire acondicionado, el cual es utilizado en el proceso de fermentación y en la carga del material, como refrigerante.
- El MT se une al extrusor y a los reactores, a través de fuelles de fácil montaje.
- Los equipos de relevancia en esta planta, fueron diseñados para operar en forma aséptica.
- La superficie que ocupa la planta es rectangular, de 22m x 19m aproximadamente.

Es importante destacar que, teniendo en cuenta la disposición en terreno de los reactores, del mecanismo de carga y del sistema productor de pellets (extrusor), la planta podría ser ampliada a cinco reactores. En este caso, los reactores deberían estar separados a 60°, tal como se indica en el ANEXO N°3, donde se encuentra un esquema de la planta en dos vistas: elevación y horizontal.

### *1.1.2 Proceso de "Upstream"*

#### Extrusión

El tema fundamental que se investigó en esta etapa, fue encontrar condiciones de extrusión y composición del sustrato para garantizar la preservación de su estructura durante la fermentación, como se menciona en el punto A1, "Preservación de la estructura del sustrato" del Informe de Avance N°1. Estudios preliminares de laboratorio, durante el Proyecto FONDEF 2-50, han permitido establecer que el sustrato extruido presenta propiedades adecuadas para el cultivo de hongos filamentosos. Por otro lado, con las condiciones utilizadas hasta antes de este Proyecto, las propiedades viscoelásticas del medio pelletizado no se mantenían, lo que limitó las posibilidades de agitación del lecho y redujo el número de fermentaciones exitosas.

Por lo anterior, se consideró realizar una serie de experimentos de extrusión para mejorar las propiedades mecánicas de los pellets. Inicialmente se consideró realizar los experimentos en Francia, lo que no fue posible. El contacto en Francia para realizar las extrusiones (Prof. Paul Moulin) cambió de funciones, teniendo actualmente un grado de

responsabilidad mayor, lo que imposibilita su supervisión en los ensayos necesarios. Por otra parte, se consiguió realizar los ensayos de extrusión (así como producir el total del sustrato necesario para las fermentaciones) en la empresa Dos en Uno. Esto tiene un beneficio adicional, ya que se pudo tener una visión más cercana de la problemática de extrusión, a la vez que realizar una supervisión directa de las pruebas realizadas. Los ensayos mecánicos de las diversas mezclas extruidas, con diferentes condiciones de humedad, y del sustrato fermentado, se realizaron en el nuevo Laboratorio de Biomateriales del DICTUC S.A.

Por lo tanto, como en el ítem "Usos de Bienes de Capital" de los Términos de Referencia se consideraron el uso de bienes pertenecientes a DICTUC S.A. y a BASF Chile S.A., se incluyeron los gastos de "Arriendo del Laboratorio de Biomateriales", recientemente incorporado al DICTUC S.A., donde se realizaron los análisis de propiedades de textura del material extruido bajo diferentes condiciones de composición y dosificación de humedad, pre y post-fermentación (esta actividad, con un número menor de pruebas, es la que estaba previsto inicialmente realizar en Francia). Esta forma de trabajo tuvo la ventaja adicional de contar con la supervisión del Prof. José Miguel Aguilera, autoridad reconocida mundialmente en este tipo de análisis.

En lo relacionado a la composición del sustrato, se evaluaron diversas mezclas de salvado con germen de trigo, para mejorar la resistencia mecánica de los pellets (ANEXO N°5). En la Tabla 1 se indican las experiencias principales.

Tabla 1 - Datos técnicos de las muestras analizadas.

Muestra	% Gluten	Humedad	Extrusión	Fermentado
A	0.8	10.3	NO	NO
B	2.0	11.2	NO	NO
C	5.0	10.8	NO	NO
D	0.8	52.4	SI	NO
E	2.0	51.5	SI	NO
F	5.0	63.6	SI	NO
G	2.0	73.2	SI	SI

Luego de diversos ensayos en el Laboratorio de Biomateriales y en el biorreactor piloto, se determinó que la composición más adecuada para obtener un pelletizado con buenas propiedades viscoelásticas (tanto en la etapa previa a la fermentación como durante la misma) y para una carga nominal de 102Kg secos, es: 80Kg de salvado de trigo, 20Kg de almidón y 2Kg de gluten de trigo.

Analizando los resultados de extrusión, se establecieron las siguientes condiciones de operación para el equipo extrusor, con el objeto de garantizar la formación de un pellet adecuado:

- Temperatura en el proceso superior a 110°C, en periodos cortos, con alta presión. La presión hace que las bacterias sean más termolábiles, por lo que no es necesario subir la temperatura a 130°C, como se menciona en el punto A1, "Preservación de la estructura del sustrato", parte (a), del Informe de Avance N°1.

- Capacidad nominal de 0,6lt/seg (equivalente a 850Kg/h de substrato).
- Tamaño del pellet, entre 4-5mm de largo y diámetro de 3mm.
- Humedad de salida -en lo posible- inferior a 25%.
- Temperatura de salida inferior a 100°C.

Los dos últimos puntos no son cruciales, ya que el equipo transportador es capaz de bajar la humedad y la temperatura en forma substancial. Se solicitó una cotización por un extrusor industrial a las siguientes empresas:

- Equipos Industriales S.A.C.I.  
(Wenger Manufacturing) Av. Portugal 605, Stgo, Chile.
- APV Copyright  
Newcastle-under-Lyme, Staffordshire, ST5 7RG, England.
- TJF S.A.  
Ctra. Alcañiz Km.28. 50.700 Caspe (Zaragoza), España.
- OKA Biscuit Machines  
F: 49 6151 50990 Fax: 49 6151 509943 Germany

De éstas, la única que respondió con una oferta fue Equipos Industriales S.A. El equipo que ellos recomendaron es un "Universal Pellet/Cooker 1k", de la empresa Wenger, cuyo costo es de US\$201.300. Si se considera que el costo de cada reactor esta evaluado aproximadamente en US\$70.000, resulta excesivo el costo del extrusor. Además, el equipo "Wenger" presenta una serie de cualidades y especificaciones que resultan excesivas para esta aplicación.

Finalmente se contacto a la empresa Fima Ltda. (Sotomayor Ruiz y Compañía Limitada), quienes han fabricado con éxito, extrusores para aplicaciones simples. Se les solicitó una cotización, la que fue entregada con las siguientes especificaciones:

- Fabricación de máquina extrusora para producción de pellets.  
Características: Sin fin de 4 entradas.  
Camisa de 2 entradas.  
Acero bora templado, dureza Rc. 60-62.  
Cubierta, protección y salida de pellet en acero inoxidable.  
Cono de llenado en acero inoxidable.

El valor cotizado por este equipo es de \$ 8.800.000, y cumple con las necesidades de esta aplicación, por lo que fue considerado en la evaluación económica del Proyecto. Se debe hacer notar, que en el Informe de Avance N°1 se consideró un costo de US\$ 200.000 para el equipo de extrusión, lo que coincide con el orden de precios del extrusor cotizado por la empresa Equipos Industriales S.A.. Este único extrusor se usa para la carga de todos los reactores con que cuente la planta industrial, por medio de un sistema de transporte de material con características especiales, según se indica a continuación.

### **Transporte, enfriamiento, humidificación e inoculación**

Este proceso involucra el transporte del material extruido desde el extrusor al biorreactor. En esta etapa de transporte, se debe lograr un enfriamiento y acondicionamiento de la humedad del medio extruido a valores adecuados para la

incorporación del inóculo, el que debe quedar distribuido en forma homogénea. Todo este proceso debe ser aséptico y realizado en forma continua.

En el punto A1, "Esterilidad carga substrato" del Informe de Avance N°1, se reportó el diseño de un tornillo transportador para llevar a cabo estas operaciones. Sin embargo, después de realizar algunos experimentos de transferencia de calor en el ámbito de laboratorio (ANEXO N°1), se determinó que el mecanismo de enfriamiento en el tornillo transportador es insuficiente. Los diseños de prototipos de ensayo se realizaron en los Talleres de Ingeniería Mecánica de DICTUC S.A. Además se plantearon dudas sobre la capacidad del substrato recién extruido (caliente y húmedo) para soportar el esfuerzo mecánico aplicado por el tornillo, sin perder su estructura.

Por lo anterior, se volvió a diseñar el sistema de transporte considerando los resultados obtenidos en los experimentos de enfriamiento (ANEXO N°1). El problema fue resuelto con el diseño de una malla metálica transportadora, la que permite trasladar el material proveniente del extrusor, enfriarlo, humidificarlo e inocularlo en su trayecto hasta el biorreactor.

El elemento principal es una malla de acero inoxidable, especialmente fabricada para su utilización como cinta transportadora. La ventaja de utilizar una malla en vez de una cinta, es que la malla permite el flujo transversal de aire, lo que favorece de manera significativa el enfriamiento del material transportado. Tanto el cuerpo (chasis) del mecanismo transportador, como los elementos internos (baffles, canalizado de aire, refuerzos, pernos, etc.) son de acero inoxidable, AISI 304. Las guías y patines, sobre los que se desplaza la malla son de Technyl. De este modo, el funcionamiento es suave, silencioso, económico y, lo más importante, sin producir un desgaste de la malla, que es el elemento más costoso.

El equipo está dividido en dos cámaras: la cámara de enfriamiento que tiene aproximadamente 4m, y la cámara de inoculación que tiene 1,7m. La zona de enfriamiento tiene dos tapas; una pequeña -que tiene boca de entrada de material proveniente del extrusor- y una grande (4m) -que tiene tres escapes de aire caliente. Esta zona es ventilada con aire, el cual es obligado a pasar en forma transversal por la malla, lo que produce un enfriamiento muy efectivo. El aire es proporcionado por el mismo equipo que se utiliza en el reactor durante el proceso de fermentación. La zona de inoculación también tiene dos tapas: una de 1,7m -que está equipada con aspersores para la inoculación- y otra vertical -que facilita la limpieza interior.

Todas las tapas (4) se fijan a través de pernos y llevan un sello de goma. Para asegurar que el equipo no se contamine con aire externo, todas las uniones llevan sellos y pernos con sellos. Además, se considera la instalación de válvulas de 1 1/2" para introducir vapor a alta temperatura, logrando así una desinfección efectiva del mecanismo antes de ser utilizado.

La malla tiene un ancho de 400mm, el ancho efectivo de la cama de substrato transportado es de 200mm y el espesor 25mm. La velocidad de la malla es 720cm/min, lo que da como resultado una capacidad volumétrica de 36lt/min. De este modo, se puede completar la carga del reactor (aproximadamente 6500lt) en tres horas.

A diferencia del tornillo transportador, este sistema de transporte no exige esfuerzo mecánico al substrato extruido. Si bien este medio de transporte no produce un mezclado

del material (como lo hace el tornillo), se considera que esta acción no es necesaria. La naturaleza de cama con altura uniforme del medio transportado favorece que los aspersores logren una humidificación e inoculación homogénea.

Se debe aclarar un punto con respecto a la humedad: el substrato extruido soporta una humedad aproximadamente de 65% antes de perder su estructura de "pellet". Por otra parte, en el proceso de inoculación, la temperatura no puede ser mayor a 30°C ya que provocaría la muerte de la biomasa inoculada. Además, en este proceso no sólo se introduce inóculo al substrato, sino también nutrientes disueltos en agua fresca, con lo que se logra una mejor homogeneización. Por este motivo, el substrato debe llegar a la cámara de inoculación con mínima humedad y, así, poder introducir más agua antes de comenzar la fermentación, sin que la concentración inicial sobrepase el 50%.

En definitiva, todo este mecanismo mejora ostensiblemente la situación actual, en que primero se produce la carga del reactor, y luego la inoculación y humidificación, no logrando una buena homogeneización. Por otro lado, actualmente la carga es manual, lo que implica posible contaminación, riesgos para el operador y lentitud. Por lo anterior, la carga manual no es aplicable a una producción industrial.

El costo de este equipo para la planta de escala industrial es de \$ 5.770.000. Se requiere sólo uno de estos equipos para una planta de capacidad máxima de 5 reactores. Los detalles del equipo y su evaluación se encuentran en el ANEXO N°2.

### *1.1.3 Proceso de Producción*

#### **Problemas del reactor piloto y soluciones desarrolladas**

En este punto, se analizan los principales problemas presentados por el reactor piloto del LFS/DICTUC (desarrollado durante el Proyecto FONDEF 2-50). Así mismo, se indican las soluciones implementadas (ver Fig.1), las que han sido consideradas en el diseño del nuevo reactor industrial.

- Problemas dimensionales

Gran parte de los problemas de este equipo son causados por la tolerancia excesiva de sus dimensiones. Por un lado, el deficiente cilindrado de la cámara intermedia o de fermentación (que rota en torno a su eje), no permite que los sellos de goma (unión entre las cámaras superior e inferior con la intermedia) cumplan su función eficientemente. Los raspadores internos, que debieran despegar el material adherido a las paredes, tampoco pueden ser utilizados, ya que las paredes no describen un movimiento circular, sino elíptico. Por este motivo también, el engrane entre la corona y el piñón motor no es el adecuado, produciendo fuertes vibraciones.

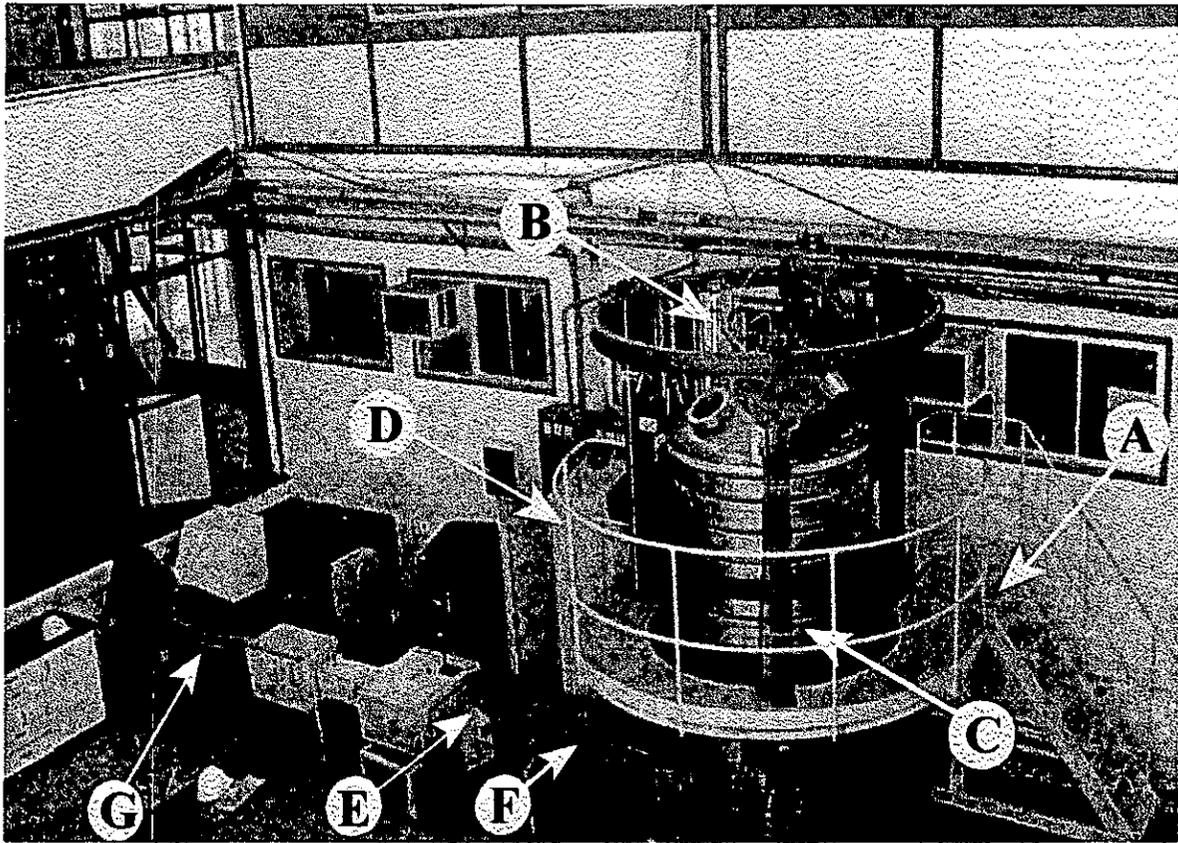


Fig. 1 - Modificaciones hechas al reactor piloto: (A) Escalera y Pasillo de Inspección; (B) Pistón neumático para el sistema de medición de temperatura; (C) Sello de agua; (D) Tablero Eléctrico de Fuerza; (E) Sistema de radiación UV; (F) Ducto de entrada de aire de acero inoxidable y (G) Ducto de entrada directa de aire.

En el nuevo diseño se consideran planchas de 4 mm, que son más fáciles de cilindrar. Además, este espesor es suficiente para lograr la resistencia de la estructura, gracias a otros elementos rigidizadores. Lo anterior involucra una disminución de costos importantes en material y manufactura. Se consultó al personal técnico de la extinta Alumncar sobre los problemas que ellos tuvieron en la fabricación del reactor piloto, y así, considerar soluciones alternativas en el diseño. En esta parte, se solicitó además apoyo de consultoría a la maestría AGROANDINA.

- Problemas con los sellos

Los sellos de goma utilizados en el reactor son demasiado rígidos, por lo que no son capaces de absorber las deformaciones del cilindro. Además ejercen un esfuerzo por roce excesivo (actúa en todo el diámetro), lo que involucra más consumo de energía y un prematuro desgaste de estos.

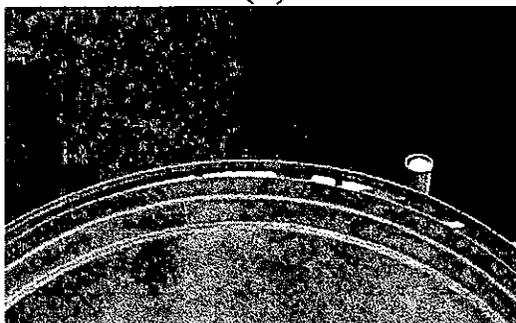
Por otra parte, en las primeras fermentaciones de producción realizadas se pudieron constatar vestigios de contaminación, en menor grado que las realizadas durante la ejecución del Proyecto FONDEF 2-50, pero igualmente considerables. Por esta causa, se decidió cambiar uno de los sellos de goma (el que vincula las cámaras inferior e

intermedia), probable fuente de contaminación por falta de hermeticidad, por un “sello de agua”. Este sistema permite una excentricidad “ilimitada” entre las partes, el consumo de energía es mínimo, no presenta desgaste y se acopla con gran facilidad. Está compuesto por una canoa con forma de “U”, que describe un círculo cerrado en un plano horizontal. La “U” se mantiene con agua, y el sello se logra al acoplar un cilindro abierto en su parte inferior, con el círculo descrito por la “U”. Se entiende que la canoa está unida herméticamente a una cámara inferior y el cilindro a una cámara superior. La presión interna que soporta este sello depende de la altura de columna de agua.

La construcción del sello de agua lo realizó la maestranza AGROANDINA, principalmente durante el mes de febrero. En la Fig.2 se aprecia la disposición de este sello en el reactor.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 – Sello de agua fabricado: (a) Vista superior de la canoa de agua; (b) Casquete inferior canoa de agua (fijo); (c) Casquete superior del sello (móvil).

- Problemas de mezclado

Los impulsores elevadores, en conjunto con el movimiento de rotación de la cámara de fermentación, realizan la mezcla del sustrato en el proceso. Estos elevadores, son tornillos helicoidales de banda, instalados verticalmente, de manera que al girar elevan el material. Sin embargo las hélices utilizadas inicialmente tenían una banda muy angosta, por lo que su poder elevador era mínimo. Además, la velocidad con que eran operadas era insuficiente y el material se aglomeraba en la hélice. Esto se solucionó con un nuevo diseño de las hélices, en que la banda es considerablemente más ancha y se redujo el paso a la mitad en relación al diseño anterior, tal como se aprecia en la Fig. 3. Además, se aumentó la velocidad de rotación en aproximadamente 10 veces (hasta 100rpm).

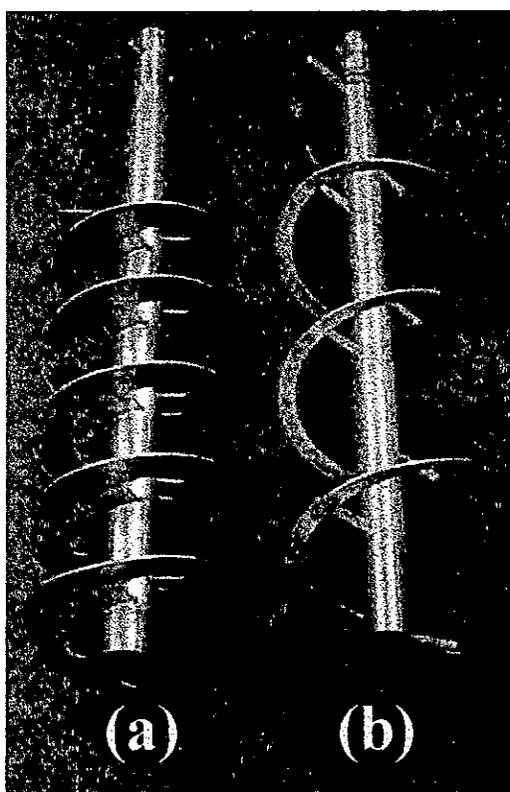


Fig. 3 – Foto de los impulsores usados en el reactor.  
(a) diseño nuevo; (b) diseño antiguo.

Para probar este nuevo diseño de elevadores se debió adquirir motorreductores de mayor velocidad y potencia (100rpm de salida, 1.5Kw) y, a su vez, variadores de frecuencia apropiados. Estos dispositivos fueron adquiridos en la empresa SARGENT S.A., mientras que los nuevos elevadores se fabricaron en la maestranza Agroandina.

Se debe aclarar por que no se utilizaron los impulsores ofrecidos por la empresa BAFCO PROCESOS, señalado en el punto A.2, “Aumento del rendimiento.....”, del Informe de Avance N°1. Después de estudiar las características de dichos impulsores, se determinó que no revestían gran diferencia con los elevadores existentes, a excepción

de las modificaciones que se hicieron en los nuevos elevadores, y esta empresa no dio garantías de que estos fueran a funcionar en forma apropiada.

Desde la primera puesta en marcha del reactor piloto con el nuevo sistema elevador, se puso de manifiesto el gran avance en este aspecto. Los buenos resultados obtenidos, permitieron adoptar éste como el diseño definitivo para ser utilizado en el reactor industrial.

- Problemas con el medio de cultivo

Uno de los principales factores que influyen en un proceso CSS es el soporte utilizado como medio de cultivo. Este medio no sólo debe aportar los nutrientes necesarios para el crecimiento adecuado del microorganismo, sino tener la rigidez suficiente como para mantener su estructura del mejor modo posible, pese a la degradación experimentada. Este factor es fundamental, para asegurar una buena aireación del medio, tanto para favorecer la respiración del microorganismo como para lograr una buena remoción del calor metabólico generado.

En el Proyecto FONDEF 2-50 se determinó que trabajar con un medio extruido presenta bondades importantes para el proceso, ya que los pellets que se forman como resultado de la extrusión permiten que el microorganismo pueda penetrar hacia su interior sin destruir su estructura, al tiempo que el diámetro de las partículas resultantes impiden que pasen por la base perforada del canasto hacia la cámara inferior.

Uno de los principales problemas que surgieron con este nuevo medio fue la destrucción del pellet durante la agitación impuesta mientras se agrega agua al sistema, cuando la humedad era superior al 65%. Esta situación convertía al lecho en un medio pastoso, a través del cuál no podía circular el aire, favoreciendo la contaminación por microorganismos anaerobios.

Como parte de este Proyecto se consideró la optimización del medio extruido, de forma tal que aumentase su tolerancia al estrés mecánico a humedades altas, y pudiese mantener su estructura de pellet hasta el final del proceso. Con este fin, se agregó gluten de trigo, proporcionando un medio más rico en proteínas, a la vez que contiene aglutinantes que favorecen la compactación de los pellets. Para determinar la dosificación más adecuada de la mezcla de componentes para usar en el proceso de extrusión, se hicieron análisis de textura de muestras extruidas. Las extrusiones se realizaron en la empresa DOS EN UNO, y los análisis en el Laboratorio de Biomateriales de DICTUC. Los resultados completos de este estudio se encuentran en el ANEXO N°5.

Como en el ítem "Servicios Contratados y otros gastos" se incluyen las actividades realizadas por entidades o personas externas a DICTUC S.A. y a BASF Chile S.A., se consideraron los gastos de "Ensayos y Producción de Substrato Extruido", para las pruebas de extrusión realizadas bajo diferentes composiciones y elaboración del medio a utilizar durante las fermentaciones, hechas en la empresa DOS EN UNO.

A partir de la dosificación de componentes más conveniente, tanto del punto de vista de su rigidez como de su poder fermentativo, se extruyó material para evaluar el medio en el reactor piloto. En la Fig.4a se muestra el medio antes de la extrusión y, en la Fig.4b, después de la extrusión. Por otra parte, en la Fig.5a se muestra el medio que resulta finalmente después de terminado el proceso con el nuevo agitador; mientras que en la Fig.5b el que se obtenía con el antiguo agitador. Puede observarse como, pese a la degradación resultante, el medio mantiene su estructura de pellet. Esto permite además obtener un lecho más homogéneo, facilitando el desarrollo del microorganismo y reduciendo las canalizaciones de aire.

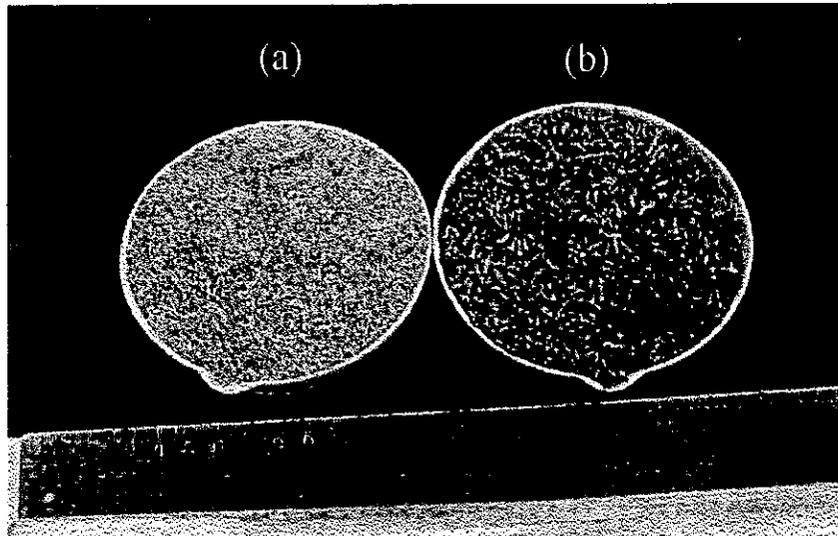


Fig. 4 - Medio de cultivo utilizado para el proceso CSS.  
(a) Mezcla antes de extruir; (b) Mezcla extruída antes de fermentar.

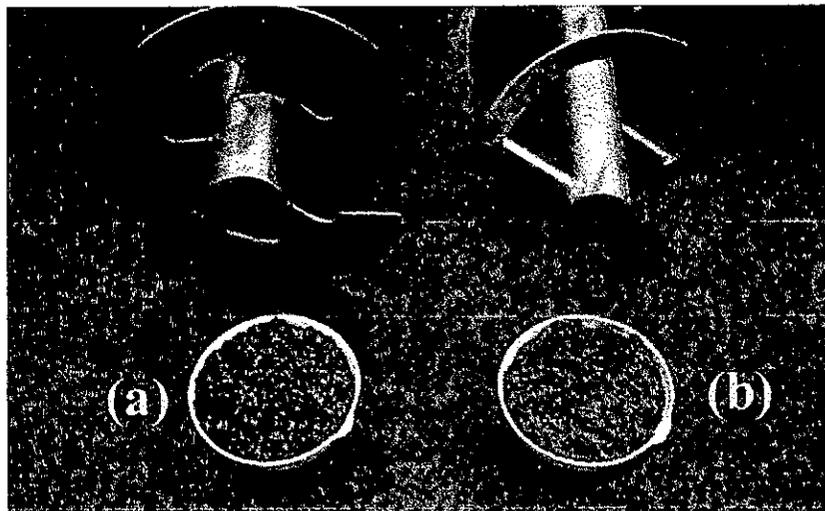
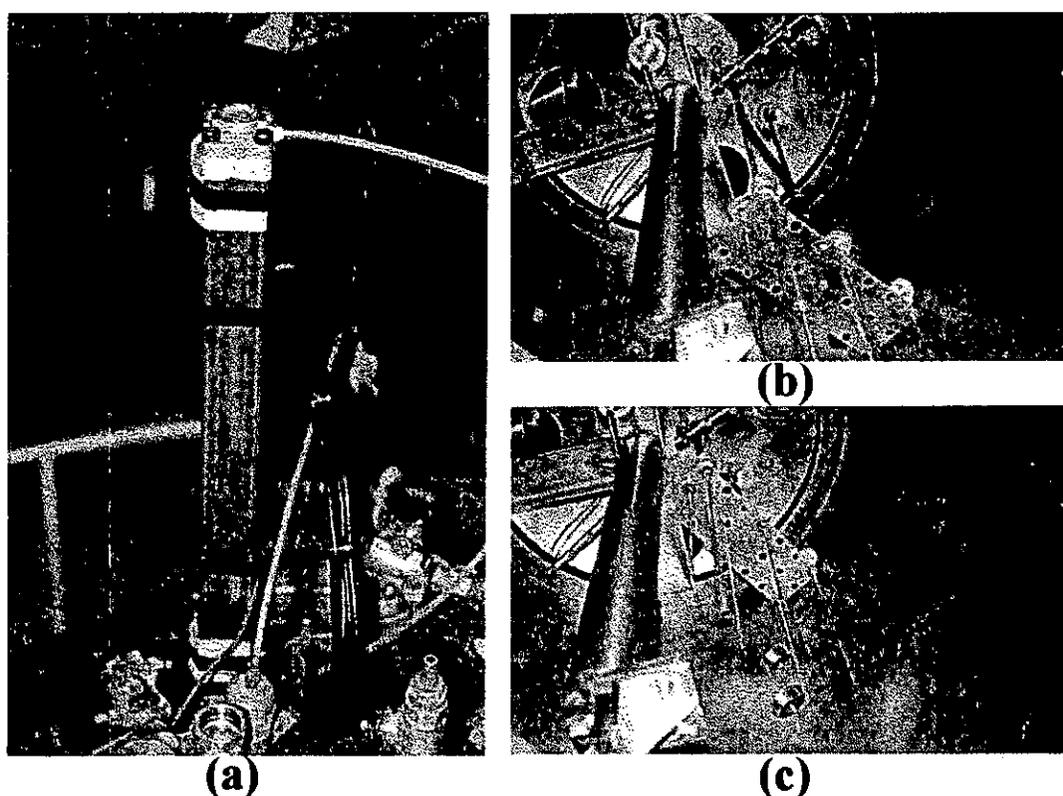


Fig. 5 – Medio resultante después de un proceso CSS:  
(a) con el nuevo agitador; (b) con el agitador antiguo.

- **Medición de la temperatura en el interior del lecho**

Hasta que se iniciara este Proyecto, se utilizaban termocuplas fijas en el interior del lecho, lo que daba problemas al momento de mezclar, por la aglomeración de material que se formaba alrededor de ellas. Además, por la disposición horizontal de las termocuplas, eran de difícil calibración. Esto fue reemplazado por un diseño con termocuplas verticales móviles, que son extraídas del lecho sólido por un sistema neumático, tal como se muestra en la Fig.6. La elevación del conjunto de termocuplas se realiza durante el periodo de mezclado, de manera que no representen un obstáculo durante la agitación, para insertarlas nuevamente en el medio después de terminada la agitación. Este nuevo sistema de medición de temperatura fue incorporado en el reactor piloto (ver Fig.1), y ha demostrado un funcionamiento muy satisfactorio.



**Fig. 6 – Dispositivo medidor de temperatura:**

- (a) cilindro neumático;
- (b) bastidor de termocuplas en la parte inferior del canasto;
- (c) bastidor de termocuplas en la parte superior.

Este trabajo, por tratarse de un sistema mecánico de precisión, se realizó con equipamiento y personal del Taller de Ingeniería Mecánica de DICTUC, quienes tuvieron un receso de vacaciones en febrero, por lo que se culminó el trabajo en la segunda semana de marzo. Las actividades realizadas fueron:

1. Diseño del bastidor que soporta el conjunto de termocuplas.
2. Fabricación del dispositivo.
3. Acondicionamiento del reactor para trabajar con el nuevo sistema.
4. Montaje, instalación y puesta a punto del sistema de medición.

Por las razones indicadas, se incorporó el ítem "Arriendo de Talleres de Ingeniería Mecánica" de DICTUC S.A. dentro de "Uso de Bienes de Capital", para realizar los servicios de mecanizado de precisión requeridos durante la ejecución del Proyecto.

- Problemas de instrumentación y aspectos concernientes al control

La primera fermentación de control tuvo que ser interrumpida debido a que no se pudo evaluar el algoritmo desarrollado, por las interferencias eléctricas producidas por los variadores de frecuencia sobre las señales de control. Para solucionar este problema se hizo necesario la fabricación de un nuevo tablero eléctrico de fuerza que incluye todos los elementos que causan interferencia, de manera de neutralizar su efecto (ver Fig. 7).

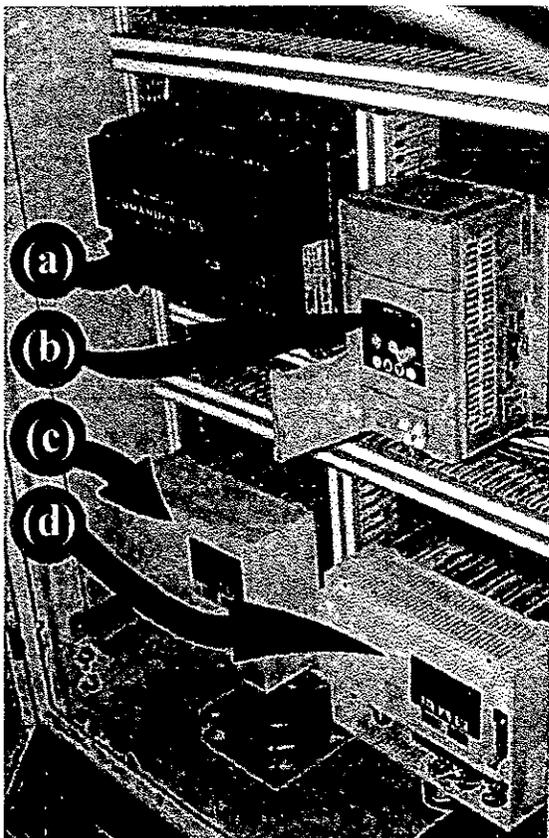


Fig. 7 - Disposición de los variadores de frecuencia en el tablero de fuerza: (a) VF comando agitador interno; (b) VF control de flujo; (c) VF comando agitador externo; (d) VF comando giro canasto reactor.

Es importante destacar que en el punto "Variador de Frecuencia" del ítem "Adquisición de Bienes de Capital" se refiere al equipo adquirido para el control de Flujo ("Hitachi L-100"), para individualizar este elemento del variador de frecuencia adquirido para controlar separadamente la velocidad de cada agitador ("Hitachi J-100"), el que fue incorporado al grupo "Agitadores/Raspadores".

El conjunto de las modificaciones estructurales realizadas al reactor piloto fue incluido en el ítem "Modificación Reactor CSS", y comprende los cambios realizados para

lograr mejoras en cuanto a la asepsia de su operación, la disminución de condensación de agua y la seguridad del personal de operación. Para estas modificaciones se tuvo en cuenta el presupuesto inicial considerado, dada la reducción de gastos obtenida al fabricar los agitadores en Chile.

En cuanto al resto de los problemas y modificaciones realizadas, cabe destacar que originalmente se consideró la reposición de la celda de medición del sensor de oxígeno con que cuenta el gabinete de instrumentación del reactor piloto, así como la del laboratorio (ítem "sensor de Oxígeno" en "Adquisición de Bienes de Capital"), cuya medición es esencial para evaluar el seguimiento de una fermentación, ya que su vida útil oscila entre 9-12 meses. Además, la adquisición de un sensor de humedad relativa, para medir y controlar esa variable en el aire de entrada al reactor, ante la imposibilidad de reparación del antiguo sensor VAISALA por parte de su representante en Chile (METCOM Ltda.).

Sin embargo, hubo que considerar otros trabajos de reparación, mantención y asesoría en lo que concierne a Instrumentación y Control. Al respecto, se reparó el medidor de CO<sub>2</sub> (que en conjunto con el sensor de oxígeno, determinan el estado de una fermentación, lo que puede evidenciar la presencia de contaminación), la balanza analítica (usada para la preparación de soluciones, medios y determinación del contenido de humedad en el lecho), el cromatógrafo de gases (empleado en la determinación de componentes del Fitoplus), módulos del PLC (componentes importantes del sistema de adquisición de datos) y el compresor de aire (utilizado en el sistema neumático de medición de temperatura). Por otra parte, se incluyó a Iván Solar como consultor en el área de Control Automático en lugar de Iván Alvarez, con el doble de dedicación a la prevista para este último.

- Toma muestras

Actualmente, el modo de tomar muestras del substrato en fermentación se realiza en forma manual, lo que involucra una fuente de ingreso de contaminación. Con antelación al Proyecto, no se disponía de un acceso expedito a la boca de carga del reactor. Esta situación traía aparejado un riesgo en la seguridad del operador, y se dificultaba la asepsia necesaria durante el proceso carga del medio de cultivo. Para solucionar este inconveniente, se construyó un pasillo de carga e inspección (ver Fig.8). Esto fue desarrollado durante el mes de febrero por la maestranza AGROANDINA.

En cuanto al método empleado para tomar muestras, aún es bastante rudimentario, pero se está trabajando en el diseño de un toma muestras automático y aséptico. Consiste básicamente en un tornillo angosto helicoidal que se introduce en el lecho, obteniendo una muestra diferenciada de todo el perfil del mismo.

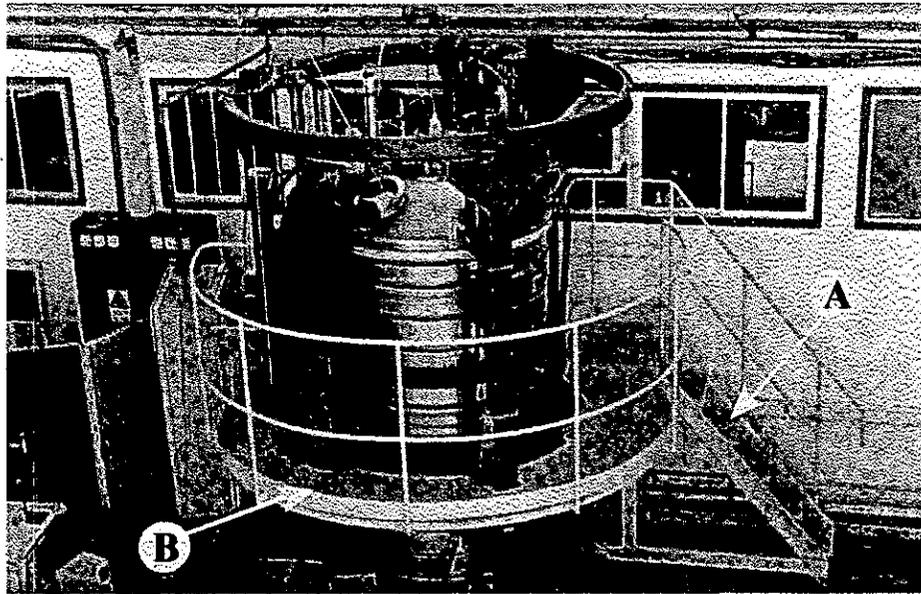


Fig. 8 - Vista panorámica de (A) escalera y (B) pasillo de inspección.

- Minimización de la contaminación del lecho

Las fermentaciones realizadas durante la ejecución del Proyecto Fondef 2-50 revelaron que el rendimiento del proceso en la producción de Fitoplus depende sustancialmente de la ausencia de contaminación (microorganismos indeseados en el medio de cultivo). Por lo tanto, es indispensable el diseño de un reactor aséptico, que opere bajo tales condiciones durante el transcurso de todo el proceso (6 días).

Se mencionaron dos posibles fuentes de contaminación, sobre las cuales se propusieron modificaciones: el sello de agua y el sistema de toma de muestras. Sin embargo, la fuente más probable de ingreso de contaminación es a través del aire de entrada al reactor. Por lo tanto, para asegurar la esterilidad del mismo, el ducto por donde ingresa al reactor cuenta con una serie de elementos destinados a este fin. El diseño antiguo incluía un sistema de prefiltro de aire y un filtro absoluto que bloquea el paso de partículas superiores a  $0.3\mu\text{m}$ . En la Fig.9 se muestran las nuevas modificaciones incorporadas.

Para mejorar aun más la pureza del aire de entrada, se construyó en acero inoxidable la porción de ducto comprendida entre el filtro absoluto y el reactor. También, se incluyó un sistema de radiación UV para disminuir el riesgo que pasen microorganismos, así como para esterilizar esta porción del ducto. El diseño y construcción del sistema UV y del ducto de acero inoxidable lo ejecutó la empresa AQUA MASTER Ltda.

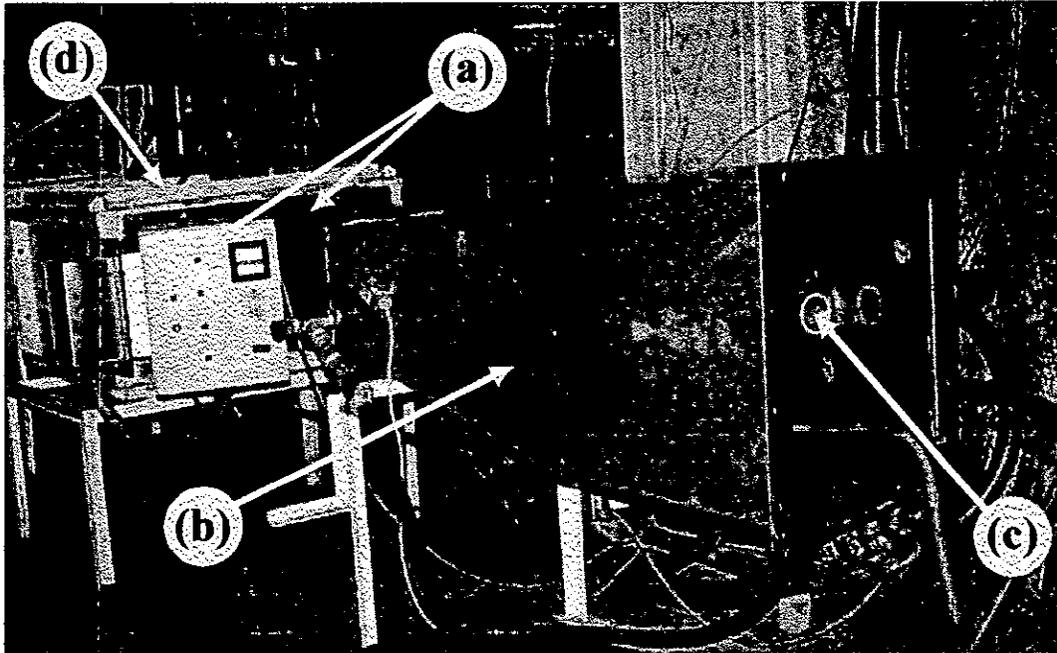


Fig. 9 - Innovaciones incorporadas para eliminar las fuentes de contaminación:  
 (a) Sistema de radiación UV; (b) Ducto de acero inoxidable (revestido);  
 (c) Punto de acceso de aire con oxígeno ionizado; (d) Filtro absoluto.

Adicionalmente, se realizó un cambio de un sistema de ionización de oxígeno, que había sido adquirido con antelación al Proyecto, por una versión modificada que pudiera ser utilizado en el reactor piloto para mejorar la calidad del aire que ingresa al mismo, así como contribuir al proceso de esterilización del reactor en la etapa de previa al comienzo de una fermentación. Este dispositivo provoca una ionización de oxígeno, que se inyecta al aire de entrada del reactor para potenciar la actividad de oxidación durante la etapa de esterilización. Durante el proceso, el aire ionizado se agrega a la salida de la turbina, lo que mejora sustancialmente la vida útil del filtro absoluto. Este sistema es un producto especialmente diseñado por la empresa OXTIV S.A. Esta situación fue considerada en el ítem "Adquisición de Bienes de Capital" al agregarle la extensión "/Ionizador" a "Sensor de Oxígeno".

Otro sitio en que pueden desarrollarse colonias de microorganismos contaminantes es en el agua que se condensa del aire de entrada. Para disminuir el volumen de condensado, se incorporó un revestimiento térmico al ducto de entrada de aire y a la base del canasto de homogeneización de aire del reactor piloto, trabajo que fue realizado por la maestranza AGROANDINA Ltda.

Cabe destacar que la empresa AGROANDINA Ltda., quien construyó los impulsores (agitadores) a un precio razonable, se interesó y apoyó el Proyecto desde su comienzo. Por esta razón, se trabajó con ella para considerar modificaciones de índole menor realizadas en el reactor, así como recurrir a su apoyo de consultoría en el diseño del nuevo reactor.

Por las modificaciones realizadas, y debido a la extensión del plazo de duración del Proyecto, se consideró el pago de un mes más de honorarios para el Ingeniero Jefe de Planta Mario Fernández (jornada completa), y para el Ingeniero Mecánico (media jornada), para que dirigieran y supervisaran las últimas modificaciones hechas al reactor. Un monto equivalente al de estos honorarios se ahorró al capacitar al Técnico de Planta Cristian Valenzuela para la determinación de Fitoplus durante los turnos realizados en los periodos de fermentaciones, por lo que resultó innecesario contratar los servicios de otro técnico para el análisis citado, como se había considerado inicialmente.

Es importante destacar que todos los aspectos incorporados al Proyecto, que no habían sido considerados en la propuesta inicial, se hicieron teniendo en cuenta no alterar sustancialmente los montos totales presupuestados por rubro, establecidos en los Términos de Referencia. Además, estas incorporaciones no fueron en desmedro de las actividades incluidas inicialmente sino que, por el contrario, favorecieron su desarrollo, ya que todas se cumplieron en cabalidad.

Todos los aspectos anteriores, están estrechamente relacionados con el "*Aumento del rendimiento obtenido en la producción de Fitoplus*", ítem A2 de Informe de Avance N°1, en el que se mencionan algunos otros aspectos, que no es el caso repetir. Sobre la base de la experiencia disponible, y de los resultados de las modificaciones de la discusión anterior, se diseñó un biorreactor industrial con las características que se indican a continuación.

### **Diseño de un biorreactor industrial aséptico para procesos CSS.**

Para lograr un mejor resultado en este trabajo, se tomó en cuenta la experiencia adquirida con el "Reactor de Fermentación Sólida" (Proyecto Fondef 2-50), existente en el LFS/DICTUC, el cual es operado con fines experimentales. Teniendo en cuenta los principales problemas presentados por este reactor, se le realizaron algunas modificaciones mecánicas y de procedimientos de operación (incorporadas en el diseño del reactor industrial) para verificar el buen resultado de las soluciones propuestas.

A continuación se analizan las principales características que incorpora el diseño del biorreactor industrial.

- *Cámara de fermentación cilíndrica (CFC)*: Tiene un diámetro de 3,5m y altura de 1,2m. Equipada con un riel cilíndrico que le permite girar en su eje, apoyada en ruedas cónicas. La tapa inferior de la cámara tiene una plancha agujereada que permite el flujo de aire.
- *Cámara superior cónica (CSC)*: Se acopla herméticamente a la CFC, con un sello de agua. La CSC puede ser elevada 0,5m a través de 3 cilindros neumáticos, desacoplándose así, de la CFC. En ella se montan los 5 elevadores (ya descritos), que son los encargados de producir la mezcla. Además, tiene la boca de entrada del material, la salida del aire y diversos instrumentos (entre ellos, el sistema de termocuplas móviles).

- *Cámara inferior (CI)*: Está montada en un carro, a través de 3 cilindros neumáticos que le permiten acoplarse a la CFC. También se utiliza un sello de agua. En el carro esta montado el equipo de acondicionamiento de aire, por lo que al desacoplar la CI, se retira todo el conjunto del lugar, dando paso al carro con la tolva que recibe el substrato ya fermentado. Por último, esta cámara tiene baffles en su interior que permiten una circulación del aire más homogénea.
- Una estructura con tres pilares y dos perfiles circulares que los unen, en el que se montan las tres cámaras y equipos auxiliares.
- Las tres cámaras tienen doble pared por donde se hace pasar vapor para el control de la temperatura. Además, esta doble pared sirve para rigidizar el reactor.
- La tapa de la CFC tiene dos compuertas que se abaten con el fin de descargar el material fermentado.
- El movimiento de rotación de la CFC lo proporcionan tres motorreductores, a través de neumáticos, sobre una banda de rodadura que tiene el cilindro de la CFC en su parte exterior. Este sistema permite un accionamiento suave y económico.
- Los sellos entre las cámaras son del tipo “sello de agua”, con una altura máxima de columna de agua de 160 mm y holgura de 60 mm (estos dos parámetros deben ser revisados en caso de llevarse a cabo el proyecto, sobre la base de la experiencia obtenida en el reactor piloto).
- Las tres cámaras son de acero inoxidable, AISI 304. Los principales espesores utilizados son 3 y 4 mm.

En la Tabla 2 se especifican los principales parámetros de diseño.

Tabla 2 - Parámetros de diseño del Reactor Industrial.

Capacidad de substrato con 15% humedad.	2500 kg
Peso específico aparente del substrato. (15% humedad)	0.39 kg/lt
Volumen de la carga.	6410 lt
Volumen interior de la cámara de fermentación, a la altura de la cama.	6500 lt
Altura de la cama de substrato en el reactor.	0.7 m
Diámetro interior del cilindro de la cámara de fermentación.	3.5 m
Tiempo de llenado de la cámara. (6410 lt)	3 hr
Humedad aproximada del substrato en el reactor.	50 %
Carga con substrato húmedo. (50 %)	4700 kg
Altura de descarga del substrato fermentado.	1.16 m
Altura de carga del substrato.	3 m
Altura máxima de la estructura.	3.9 m
Diámetro máximo de la estructura.	4.5 m

En el ANEXO N°4 se encuentran las características técnicas detalladas, los planos de fabricación y la evaluación de costos.

## **I.2 Sistema de control avanzado de Temperatura**

Un aspecto relevante para lograr un buen desempeño del Proceso es disponer de un adecuado control de la humedad y temperatura del lecho sólido.

La humedad no es posible controlarla en forma automática, ya que -por ahora- no se dispone en el mercado de sensores confiables capaces de registrar su medición en línea. En consecuencia, para poder mantener la humedad del lecho en valores apropiados, se deben tomar muestras en forma manual y determinar su contenido de humedad mediante análisis de laboratorio. A partir de estas mediciones -fuera de línea- se agrega la cantidad de agua necesaria, de acuerdo a especificaciones preestablecidas.

Con anterioridad al Proyecto, la temperatura del lecho podía ser controlada en línea, con poca intervención de un operador. Sin embargo, los resultados logrados no habían sido lo suficientemente aceptables como para considerar que este control se desempeñaba del mejor modo posible. Los inconvenientes principales se originan por las altas diferencias de temperatura entre los distintos puntos del lecho, y las posibles acciones de control se basan en la agitación del lecho así como en la manipulación de la temperatura y humedad relativa del aire de entrada.

Con la agitación obtenida mediante los impulsores que se disponían inicialmente no se lograba una buena homogeneización, debido a que dichos impulsores presentaban serios problemas de diseño, tal como se explica en el punto "Problemas de mezclado" del presente informe. Este inconveniente ha sido resuelto de forma satisfactoria con el nuevo diseño realizado como parte de este Proyecto.

Por otra parte, la manipulación de la temperatura y de la humedad del aire de entrada se hacía fijando una de ellas (mediante un control del tipo regulatorio) y estableciendo el "set-point" de la otra a través de un lazo de control PID en cascada. Esta estrategia limita las posibilidades de un mejor control, principalmente cuando se opera en los límites de las restricciones de operación que tienen estas variables. En tales condiciones, un operador adiestrado debe manipular manualmente el "set-point" de la variable con control regulatorio, como para favorecer el control y permitir que el sistema continúe operando en forma adecuada. En este Proyecto se consideró mejorar esta situación, incorporando:

- a) control automático del flujo de aire, para simplificar la regulación de la temperatura y de la humedad del lecho sólido; y
- b) control avanzado en la regulación de la temperatura del lecho.

Para controlar el flujo de aire se adquirió un variador de frecuencia Hitachi L-100, de 3,7KW, con controlador PID incorporado. Este dispositivo se lo configuró de modo tal que el valor de referencia deseado pudiese establecerse directamente desde el computador de proceso y, en caso de ser necesario, poder manipular esta referencia a partir de un algoritmo de control asociado a la temperatura del lecho.

Como algoritmos de control avanzado, se consideraron dos configuraciones distintas, a saber:

- a) *Control Heurístico*: Mediante una estrategia experta, se definen los set-points de temperatura, humedad y flujo de aire de entrada, basándose en un modelo de balance de energía del lecho, que permite estimar el calor removido. Este control se lo evaluó mediante simulaciones, obteniendo muy buenos resultados. Adicionalmente, este algoritmo se implementó sobre el sistema real, pero los resultados obtenidos no fueron buenos. La razón fundamental de las diferencias obtenidas entre ambas situaciones se debieron a que al algoritmo se sintonizó de acuerdo con los resultados obtenidos por simulación, los que se basan en el modelo matemático disponible del modelo. Por ende, los resultados indican que el modelo disponible del sistema requiere ser validado y mejorado, lo cual no significa que conceptualmente la estrategia de control propuesta sea mala, sino que se requiere seguir trabajando en el de balance de energía para lograr una sintonía adecuada del control.
- b) *Control DMC*: Esta estrategia de control ha sido ampliamente probada sobre procesos reales y es, quizás, la única que ha sido ampliamente aceptada a nivel industrial. Se basa en una ley de optimización de control que busca minimizar tanto las desviaciones producidas en torno al valor de referencia de la variable de interés, como de las acciones de control ejercidas sobre el sistema. El carácter predictivo del control y la corrección de las acciones a tomar en cada instante de muestreo lo hace robusto frente a las perturbaciones que pueda presentar el sistema. Este sistema de control mostró un buen desempeño del proceso, con una adecuada manipulación simultánea de las variables de control.

Los resultados de las acciones indicadas se muestran en el ANEXO N°6.

### I.3 Resultados de las fermentaciones realizadas

Se hicieron ocho fermentaciones para evaluar diferentes aspectos del proceso. Cuatro de las fermentaciones se realizaron con el objeto de producir GA<sub>3</sub> (fermentaciones de producción FP1 a FP4). A continuación se muestra una tabla con los principales resultados obtenidos.

Tabla 3 - Balance de GA<sub>3</sub> de Fermentaciones realizadas para producción.

Fermentación	Substrato seco Inicial (kg)	GA <sub>3</sub> SSI (gr/kg ssi)
FP1	94.60	0.81
FP2	94.27	2.91
FP3	84.00	5.46
FP4	90.00	1.63

Las tres primeras, se realizaron con el reactor piloto sin incluir todas las modificaciones mecánicas descritas en este informe. La última fermentación se realizó con el reactor piloto operando con todas las modificaciones descritas anteriormente. Puede notarse que la producción lograda en FP1 fue muy baja. La razón de este mal rendimiento se debió fundamentalmente al alto nivel de contaminación con que se desarrolló. En la fermentación

FP2 se logró un mejor control de la contaminación, pero la temperatura y humedad del lecho no pudieron ser regulados, obteniéndose un rendimiento inferior al normalmente logrado con este reactor antes del presente Proyecto (sobre 4 gr GA/kg ssi). Manteniendo un estricto control de la contaminación, temperatura y humedad del lecho, se logró un rendimiento en la fermentación FP3 nunca antes logrado con este reactor, el cual supera el rendimiento de 5 gr de GA/Kg ssi, considerado en la evaluación económica. Se pudo haber realizado más fermentaciones similares a la FP3, para asegurar verificar la repetibilidad del alto rendimiento, sin embargo en el proyecto se tomó la opción de evaluar en el reactor piloto algunas de las modificaciones mecánicas propuestas para el reactor industrial. Esto significó un atraso apreciable, lo cual sumado a los inesperados cortes de luz, sólo permitió realizar una fermentación productiva con el nuevo reactor piloto. El rendimiento obtenido en este caso, FP4, fue bajo debido a que el inóculo, preparado antes de la reacción, se contaminó con otro hongo no productor de GA's. Aquí hubo un error en la etapa de upstream que no está relacionada con las innovaciones de este proyecto. Sin embargo, esta fermentación permitió evaluar las innovaciones incorporadas, y se pudo verificar que nunca antes se había logrado un lecho tan homogéneo al final de la fermentación y un control tan estricto de la temperatura del lecho, no sólo en su valor promedio, sino que también en cuanto a los gradientes internos. Además, dada la mala calidad del inóculo inicial, la fermentación duró varios días más de lo usual, sin experimentar una contaminación apreciable adicional (normalmente bacterias y levaduras), lo cual verifica la calidad del sistema de control de la contaminación. No cabe dudas que con un buen inóculo se habría obtenido un mejor rendimiento y para verificar este punto, estamos planificando una nueva fermentación, pero fuera del contexto de este Proyecto dadas las limitaciones de tiempo.

Las cuatro fermentaciones restantes (FC1 a FC4) fueron incompletas, ya que tuvieron por objetivo probar estrategias de control de flujo/temperatura y definir parámetros de interés para el control, así como evaluar el desempeño de la agitación, del nuevo medio de cultivo y las diferentes modificaciones realizadas sobre el reactor piloto.

La fermentación FC1 tuvo por objeto probar el nuevo sistema de control de flujo, el que funcionó adecuadamente, tanto en forma manual como remota (comandado desde el computador del proceso). Además, se pretendía evaluar la estrategia de control heurístico. Sin embargo, en esa oportunidad esta estrategia no pudo ser evaluada, ya que el variador de frecuencia utilizado para controlar el flujo de aire, que opera en forma continua a diferencia del resto de los variadores que actúan sólo en los instantes de agitación del lecho, provocaba interferencias permanentes sobre las señales medidas, impidiendo el control del proceso. Este hecho provocó un cambio sustancial en la disposición de los equipos, construyendo un tablero eléctrico de fuerza, donde se colocaron todos los equipos de potencia utilizados (ver Fig. 10).

Solucionados los problemas de interferencia eléctrica, se planificó la fermentación FC2 para una duración de alrededor de 100 horas, para probar el control de flujo y el algoritmo de control heurístico. El sistema de control de flujo funcionó de acuerdo a los resultados esperados durante las primeras horas de realización del proceso, para deteriorarse posteriormente. Se descubrió que esta falla se produce debido al tipo de sensor utilizado para medir el flujo. Este sensor mide la velocidad del aire en lugar del flujo; por esta razón, requiere un frente de velocidad constante.

Recordando que el flujo se define como  $Flujo = \int_A v dA$ , para una velocidad  $v$  constante en cualquier punto del ducto, se tiene que  $Flujo \approx v \times A$ , donde  $A$  es el área efectiva del ducto por la que atraviesa el aire. Se consideró que el mejor lugar para colocar este sensor era a la salida del refrigerador (ver Fig.1) ya que, por disponer de un sistema de enfriamiento por aletas, logra producir a la salida un frente de flujo aproximadamente plano (esto se verificó como parte del Proyecto FONDEF 2-50). Sin embargo, durante el desarrollo del proceso, este sistema de refrigeración acumula hielo (principalmente en la parte inferior) con lo cual se deteriora la medición y calibración utilizada. Por lo tanto, se considera (para una etapa futura) cambiar el tipo de sensor utilizado, o modificar el ducto de aire para colocar el sensor disponible en una posición donde no se produzcan este tipo de alteraciones.

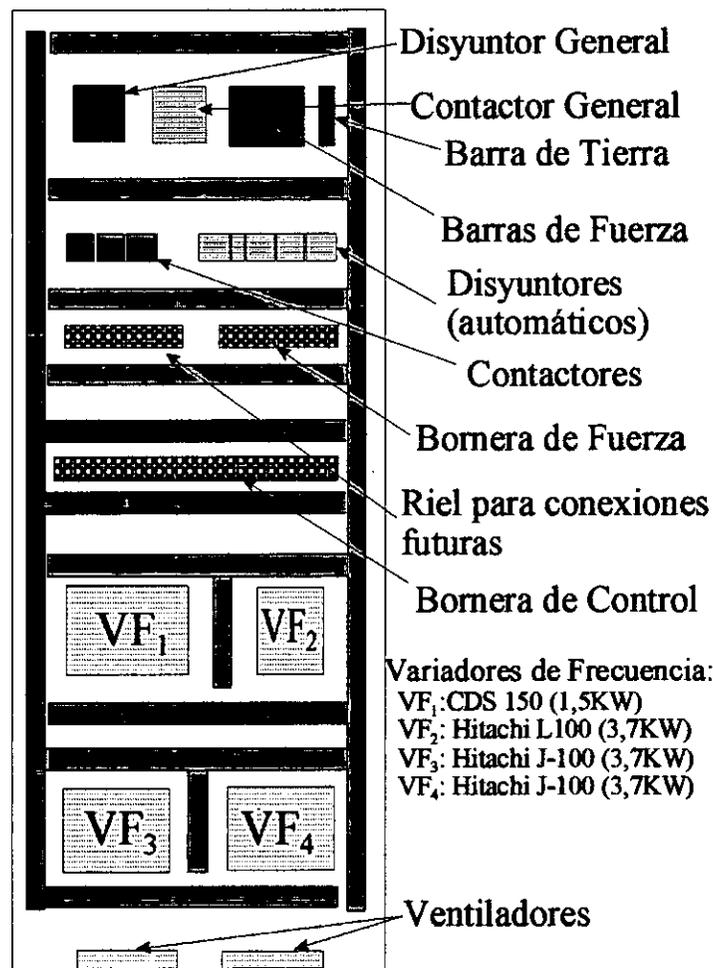


Fig. 10 – Disposición de los elementos de fuerza dentro del tablero eléctrico.

En todo caso, una ventaja considerable al controlar el flujo mediante un variador de frecuencia, eliminando el sistema de paletas manual que se tenía anteriormente, es que se logró disminuir la brecha entre las temperaturas máxima y mínima presentes en el reactor, lo que contribuye a un mejor acondicionamiento del sistema y, finalmente, en una mejora sobre el rendimiento.

En cuanto al algoritmo de control heurístico, y como ya se mencionó anteriormente, no se tuvieron buenos resultados por estar basado en un modelo del proceso que no se adecua bien a la realidad. Por lo tanto, habrá que seguir trabajando en este tema a futuro.

En la fermentación FC3 se hicieron pruebas a lazo abierto, del tipo "escalón", en los instantes críticos desde el punto de vista del control, para definir los parámetros más apropiados que permitan sintonizar los controladores PID cuando se opera con los algoritmos convencionales. Esta situación asegura una operación cautelosa durante toda la fermentación, debiendo el operador aplicar dichos parámetros de sintonía en forma manual y en los instantes requeridos. La información de estos ensayos se utilizó, además, para calcular, fuera de línea, la Matriz Dinámica a utilizar en la estrategia de control DMC.

La fermentación FC4 se realizó para probar todas las nuevas modificaciones mecánicas del reactor, así como el algoritmo de control DMC, con un único parámetro de sintonía que pesa la variación de las variables manipuladas. Esta fermentación estaba prevista realizarla en forma completa (es decir, con fines productivos), para comprobar la aseveración de obtener un mínimo de 5gr de GA<sub>3</sub> por kilo de substrato seco. Sin embargo, problemas mecánicos impidieron el normal desarrollo de esta fermentación (se rompió el sistema de transmisión de giro de uno de los impulsores al comenzar el proceso, por lo que hubo que abrir el reactor para sacarlo -lo que destruyó la asepsia del reactor-; luego, se siguió operando con sólo un impulsor). De todos modos, y pese a los inconvenientes, se pudo apreciar un adecuado desempeño del control durante el tiempo que duró el proceso (aproximadamente 80horas).

Finalmente, se hizo la fermentación FP4, con idénticos objetivos que la anterior. Sin embargo, se mejoró el algoritmo DMC, con dos parámetros de sintonía, para pesar en forma independiente cada una de las acciones de control. Los resultados no lograron alcanzar los valores de producción buscados, con un retraso en el tiempo de fermentación (8 días), debido a los problemas con el inóculo descritos más arriba. Para esta fermentación se arrendó un equipo electrógeno para mantener la energía del motor que comanda la turbina de flujo de aire (por los eventuales cortes de energía programados), para asegurar la respiración de los microorganismos y reducir los riesgos de contaminación (por la presión positiva que se genera dentro en el interior del reactor).

Los resultados de cada uno de estos experimentos de control se muestran en el ANEXO N°6.

## **II. Actividad APLICACIÓN**

Esta actividad fue completada antes del Informe de Avance N°1, por lo que en éste, se encuentra toda la información referente a ella (punto B).

### III. Actividad COMERCIAL

Esta actividad fue dirigida y supervisada por personal de DICTUC S.A. Con este fin, en el ítem "Dirección e Investigación" se incorporó a Florencio Maríquez para reemplazar a Rosario Retamal a partir del mes de febrero, por ingresar esta última en periodo prenatal a partir del mes indicado.

Por otra parte, y debido al alejamiento de "Olgierd Eysymontt" de DICTUC S.A., el ítem "Personal de Apoyo" se incluyó la contratación de servicios de María Fernández Allende para culminar el proceso de evaluación económica del Proyecto. Los resultados de esta evaluación fueron los siguientes:

#### III.1 Evaluación planta industrial de Fitoplus

Para llevar a cabo la presente evaluación se tomaron en consideración los siguientes supuestos y variables

Superficie total de uva de mesa Seedles en Chile	:	45.000 hectáreas (1)
Consumo de Fitoplus	:	180 Gramos/há
Captación de mercado	:	24% en 5 años
Producción del Proceso	:	5gr Fitoplus/ Kg SSI
Rendimiento Recuperación del proceso	:	80%
Capacidad (Kg SSI / Fermentador)	:	2500
Nº Fermentadores	:	3
Duración Total del Proceso	:	6 días
Días trabajados al año	:	365
Batch fallidos o mantención	:	10%
Precio FITOPLUS	:	1.21 US\$ / gramo (2)
Valor del Dólar	:	480 \$ / US\$
Razón litros Acetato / Kg Substrato	:	1.5
% Pérdida de solvente	:	5%
Precio Substrato (Salvado de trigo)	:	105 \$ / Kg
Costo Vapor	:	30 US\$ / Batch
Costo Agua	:	21 US\$ / Batch
Costo Electricidad	:	35 US\$ / Batch
Precio Acetato de Etilo	:	410 \$ / Lt

(1) Según Estadísticas emitidas por la Asociación de Exportadores de Chile, A.G. en su cuadro "Evolución de la Superficie de Huertos Industriales", la uva de mesa arroja las siguientes cifras en hectáreas:

1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
46.825	47.800	48.460	48.800	48.400	47.600	46.800	46.018	45.968	43.939

(2) Ver cálculo adjunto

### **III.2 Inversiones**

Las inversiones a realizar se determinaron a partir de los resultados obtenidos en la planta piloto.

Si bien se solicitaron varias cotizaciones, sólo se cuenta con la cotización formal de los siguientes equipos de fabricación nacional :

Fermentador Sólido (REACTOR): \$ 32.177.340

Extrusor : \$ 8.800.000

Equipo de transporte de Sólidos y estanque de almacenamiento del SSI: \$ 10.000.000

#### **NOTAS :**

- La cotización de los dos primeros se adjunta a la presente evaluación
- Se considero un 10% de costo adicional por seguridad
- La cotización del equipo de transporte de sólidos y del estanque de almacenamiento corresponde a una estimación realizada a partir de cotizaciones de equipos similares pero de distinta capacidad.

Los demás equipos se pretende comprarlos en el mercado formal de equipos para la Industria química, de preferencia usados.

Se solicitaron cotizaciones a 4 representantes nacionales (Equifar: Señor Edgardo Guerra; Cientec; Ivens S.A.: Sr Patricio Puente y Kelco: Sr Julio Miranda), quienes sólo nos proporcionaron costos estimativos, ya que para realizar una cotización formal deben solicitarla a sus representados y aún no cuentan con ella.

Además se buscó en Internet datos de equipos usados; sin embargo, no se encontró la información requerida.

Por último se solicitó vía Fax a las siguientes empresas:

- |                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| - Greerco                     | Fax 603-882-6029 |
| - Union Atandard Equipment    | Fax 718-993-2650 |
| - Machinery and Equipment,inc | Fax 415-467-4832 |

Las cuales, a pesar de reiterarles nuestra solicitud, aún no responden.

Por otra parte, en conversación con el Sr John Harris (Embajada E.U.A.- Area Comercial Fono 3303316) se estableció que, efectivamente, en Estados Unidos existían compañías que se dedicaban a la comercialización de equipos usados, pero que su rotación era tal que sólo al momento de requerirlo vale la pena investigar. Además se nos ofreció colaboración para buscarlos en su momento. Tanto de la información otorgada por el Sr. Harris, como por personas entendidas en el tema, se estableció que un equipo usado cuesta entre un 40 y un 60% de un equipo nuevo

De la información obtenida se tomo en consideración los siguientes valores para equipos nuevos:

#### ETAPA DE PRODUCCION

- Fermentador de Propagación	US\$ 120.000
- Estanque de esterilización	US\$ 35.000
- Mezclador de Sólidos	US\$ 20.000

#### ETAPA DE RECUPERACIÓN

- Extractor Sólido – Líquido	US\$ 100.000
- Evaporador Grande	US\$ 25.000
- Evaporador Chico	US\$ 15.000
- Envasadora	US\$ 10.000
- Otros	US\$ 20.000

#### ETAPA FORMULACIÓN Y ENVASADO

- Estanque	US\$ 20.000
- Envasadora	US\$ 35.000

#### LABORATORIO

- GCMS	US\$ 70.000
- Otros	US\$ 50.000

CONTINGENCIAS 7%

ROYALTIES US\$ 150.000

#### *III.3 Otras consideraciones y supuestos para evaluación*

- Se considera un período de evaluación de 10 años con depreciación lineal
- El valor residual considerado equivale a 3 veces el valor del último flujo.
- Los 3 reactores se irán incorporando conforme a los requerimientos
- Se consideran dos escenarios:
  - a) Fabrica Independiente
  - b) Fabrica Adjunta a otra ya existente

	Fábrica Independiente	Fábrica Adjunta
Costo Personal Valores en MUS\$	143.4	137.9 (primeros 3 años) 87.9 (posteriormente)
Gastos Generales	US\$ 15.000 (incluye Jefe Administrativo)	US\$ 5.000
Infraestructura	\$117.000.000	\$96.000.000
Terreno	\$65.000.000	0
Supervisión Construcción		US\$ 10.000
Equipo Auxiliar Const.		20% infraestructura
Ingeniería de Planta		10% Infraestructura

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos son los siguientes:

### ESCENARIO FABRICA INDEPENDIENTE

TASA DE DESCUENTO	20%	30%	40%
VAN	3.232	1.470	520
TIR	49,18%		

### ESCENARIO FABRICA ADJUNTA

TASA DE DESCUENTO	20%	30%	40%
VAN	3.551	1.720	732
TIR	53,75%		

### III.4 Análisis de sensibilidad

Para tener una visión amplia del proyecto y sus riesgos se analizaron varios escenarios, variando los siguientes parámetros:

- a) Precio del Fitoplus
- b) Inversión
- c) Precio del Fitoplus e Inversión
- d) Costos

Los resultados obtenidos a una tasa de descuento de 20%, son los siguientes:

#### ESCENARIO FABRICA INDEPENDIENTE

##### a) Variación del Precio Fitoplus

PRECIO US\$/gr	0.8	1	1.5
VAN	1.207	2.198	4.659
TIR	32,65%	41,24%	59,15%

##### b) Variación de la Inversión

Variación Inversión	Equipos Nuevos	-10%	+20%
VAN	2.955	3.334	3.028
TIR	44,06%	51,33%	45,4%

##### c) Variación del precio y de la Inversión

Variación Inversión	Equipos Nuevos	-10%	+20%
Nuevos Precios	0.8	1	1
VAN	926	2.300	1.995
TIR	28,77%	43,12%	37,91%

d) Variación del costo

Variación del Costo	-10%	+20%
VAN	3.391	2.913
TIR	50,56%	46,41%

ESCENARIO FABRICA ADJUNTA

a) Variación del Precio Fitoplus

PRECIO US\$/gr	0.8	1	1.5
VAN	1.530	2.517	4.978
TIR	36,74%	45,5%	64,21%

b) Variación de la Inversión

Variación Inversión	Equipos Nuevos	-10%	+20%
VAN	3.275	3.653	3.347
TIR	47.78	56,3%	49,34%

c) Variación del precio y de la Inversión

Variación Inversión	Equipos Nuevos	-10%	+20%
Nuevos Precios	0.8	1	1
VAN	1.249	2.620	2.313
TIR	32,23%	47,72%	41,63%

d) Variación del costo

Variación del Costo	-10%	+20%
VAN	3.692	3.270
TIR	55,09%	51,09%

### *III.5 Conclusiones*

Conforme con los resultados obtenidos en la evaluación económica, se desprende que se trata de un proyecto bastante atractivo, ya que aún en escenarios desfavorables presenta una buena rentabilidad.

Si a esto se le agrega que en el caso base:

- Se considera una captación de mercado bastante conservadora, ya que según los resultados de las pruebas realizadas utilizando FITOPLUS, en predios con buen manejo y buenas tierras, se aprecian claramente sus atributos. Según expertos los predios que presentan estas características no son menos de un 30%, cifra que ha aumentado notablemente en los últimos años.
- Conforme con los últimos resultados obtenidos en el reactor piloto, se puede establecer que su rendimiento puede ser aún mayor que los 5gr/Kg de SSI considerado en la evaluación, esto una vez que se establezcan las condiciones óptimas de operación (agitación, temperatura, etc.).
- El precio de 1.21 US\$/gramo de Fitoplus, considera sólo una parte de los beneficios que se pueden obtener, ya que los beneficios una vez que se establezcan los tipos de predios y las condiciones óptimas de aplicación se pueden incrementar notablemente (ya se han obtenido en algunas pruebas) con lo cual se podría alcanzar un mayor valor.
- En el escenario (Empresa Adjunta) existen aún costos de los cuales se puede prescindir, con lo cual se tendría aun mejor rentabilidad (Encargado de Mantención, Jefe Control de Calidad y operarios).
- Dado que se trata de un producto que sustituye una importación, es lógico pensar que es de gran beneficio para el país el que este proyecto se lleve a cabo, ya que genera empleos y nos hace más autónomos.
- Por último cabe hacer presente que existen algunas consideraciones que hacen aún más interesante el proyecto, ya que existe la posibilidad de aprovechar los residuos sólidos, obteniendo mayores ingresos por ello, lo mismo de la posibilidad de utilizar el reactor con otro fin que no sea el de producir Fitoplus.