

MANUAL AZUCARERO 2012 HERRAMIENTA DE INGENIERÍA PARA LA INDUSTRIA AZUCARERA.

Silvio Peluffo

Ingeniero Químico - silviopeluffo@arnet.com.ar

Keywords : Cane Sugar, Sugar Industry, Sugar Software, Sugar Cane Mass and Energy Balance

Abstract

Básicamente, **Manual Azucarero 2012**, es un poderoso software generador de Diagramas de Flujo, para la Industria Azucarera, con sus respectivos balances de masa y energía, en estado estacionario, donde cada equipo utilizado es rigurosamente calculado, obteniéndose los parámetros necesarios para el diseño o verificación de éstos. El cálculo necesita de las propiedades físicas y termodinámicas de los componentes, o combinación de ellos, en cada flujo, para lo cual hace uso, automáticamente, de las ecuaciones fundamentales desarrolladas al presente y que son parte de los **Programas Auxiliares**.

Introducción

Manual Azucarero 2012, aspira a ser un conjunto de herramientas de uso frecuente en la industria azucarera, facilitando los cálculos, a veces tediosos, complicados y prolongados en tiempo, ya sea en una etapa de diseño, o en la verificación de equipos existentes, generando resultados precisos rápidamente. Este software permite armar un flowsheet, a partir de **Unidades de Operación**, cuyo modelo matemático simula y calcula, rigurosamente, cada equipo característico de la industria azucarera, como evaporadores, centrífugas, molinos de caña, tachos de vacío, turbinas y generadores de vapor, etc. Las unidades de operación, seleccionadas previamente, se vinculan entre sí con **Líneas de Flujo**, por las que deberían circular, hipotéticamente los fluidos reales, representando una parte o la totalidad del proceso productivo.

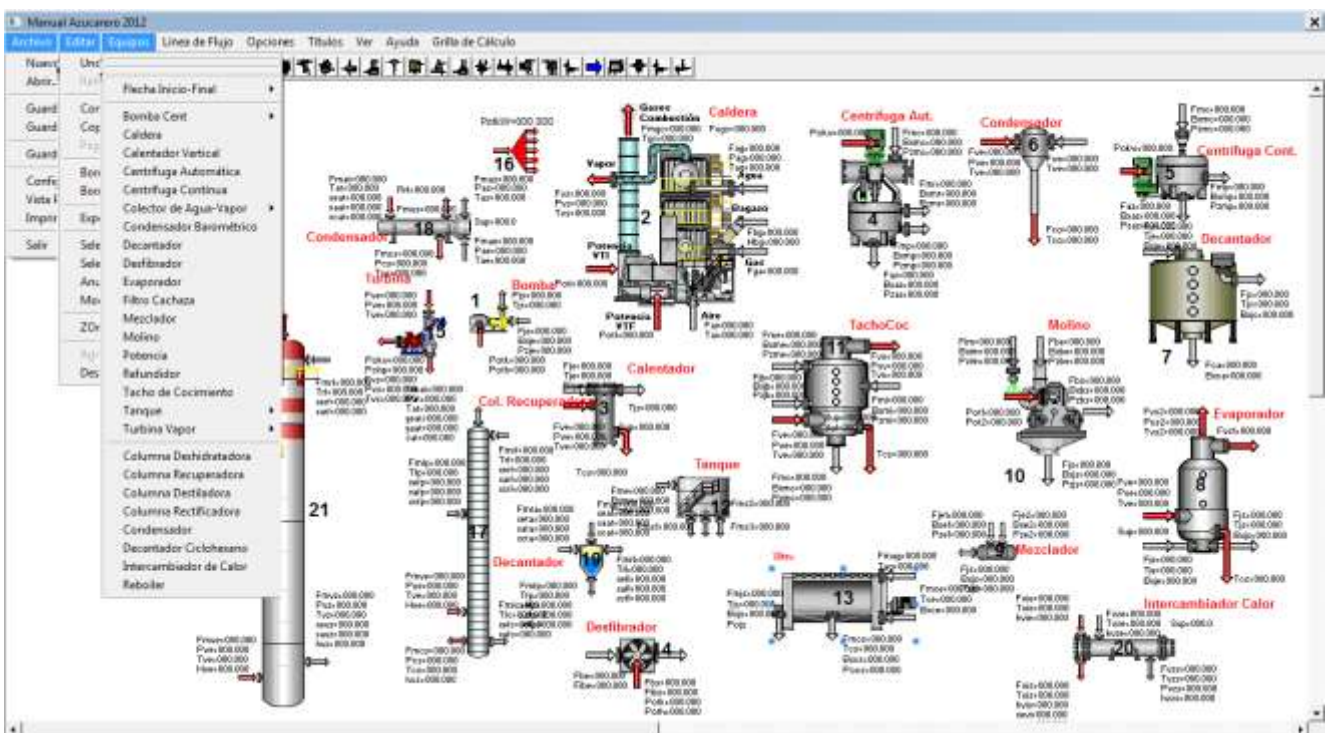


Fig.1 – Algunos de los equipos o unidades de operación utilizados en Manual Azucarero 2012.

El Programa.

Iniciamos desde el menú, un **Nuevo Proyecto**, para un flowsheet que queremos desarrollar, o desde **Abrir**, para analizar o modificar uno previamente guardado. Todos los equipos disponibles se pueden seleccionar desde el menú **Equipos** o desde la barra de tareas. El programa trabaja en dos planos, el flowsheet propiamente dicho y las **Grilla de Cálculo**, donde se muestra toda la información de cada equipo y se realiza el cálculo automáticamente. Ambos, pueden ser guardados o impresos. **Manual Azucarero 2012**, se completa con los **Programas Auxiliares**, los cuales permiten resolver otras tareas como conversión de unidades, propiedades físicas y termodinámicas del agua, vapor de agua, soluciones de azúcar, aire, etanol, ciclohexano y muchos otros fluidos. Estos se encuentran dinámicamente vinculados a las grillas de cálculo de cada equipo, lo que permite modificar inmediatamente los resultados en función de los cambios de las variables como presión, temperatura, brix, flujos, etc. En la Fig. 1, se muestran algunos de los equipos disponibles, destacándose las entradas y salida de producto como flechas.

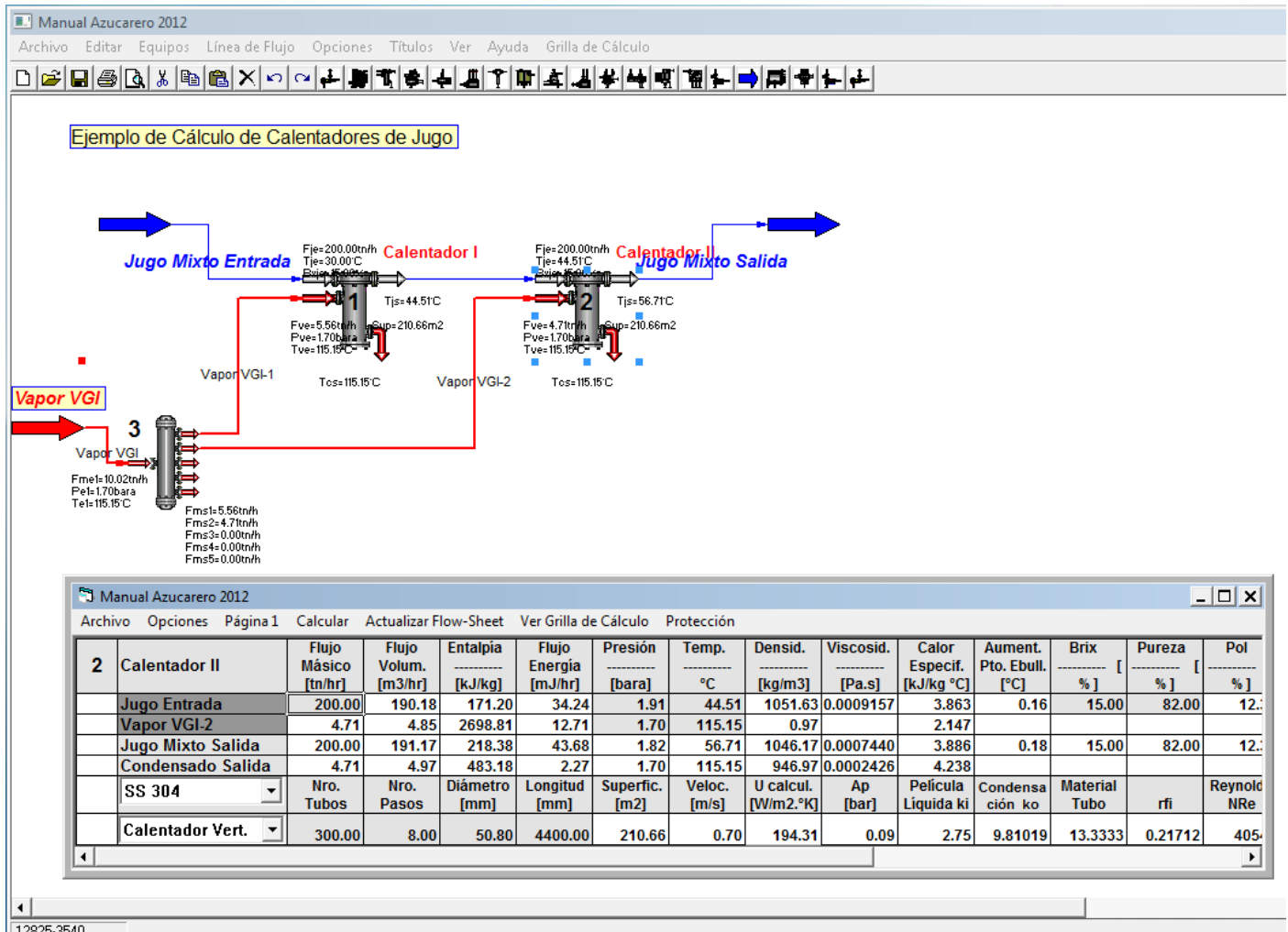


Fig.2 – Calentamiento de Jugo Mixto en dos Calentadores Verticales.

En este sencillo primer ejemplo, Fig. 2, se ha desarrollado un flowsheet para calcular el calentamiento de Jugo Mixto, en dos calentadores verticales, con vapor vegetal VGI, extraído supuestamente del primer efecto de los evaporadores, y que se distribuye desde un colector. Los equipos son arrastrados desde la barra de tareas, y posicionados en un lugar conveniente. Se los vincula con las líneas de flujo que se generan muy fácilmente, entre la salida y la entrada de cada equipo, según el fluido, y éstas se colorean y/o se define su espesor y nombre para una visualización clara. Estas líneas de flujo, que teóricamente transportan un fluido, en realidad transportan la información total de ese fluido entre cada equipo y entre cada grilla de cálculo. Estas se visualizan cliqueando en menú **Grilla de Cálculo**, desplegándose todas, una por cada equipo, solapadas, siendo visible la que corresponde al equipo que se señale cliqueándolo. Cada grilla trabaja como un spreadsheet, resolviéndose automáticamente y enviando los resultados a las grillas vinculadas por el flowsheet, las cuales a su vez, se ejecutan dinámicamente, lo que permite resolver iterativamente el proyecto. Los datos que deben ser introducidos manualmente se identifican en las celdas coloreadas.

Si los datos no se introducen o están fuera de rango, aparece un error, hasta que se corrige. Los datos para el jugo mixto serán Brix%, Pol%, Sólidos%, Flujo, Presión y Temperatura, mientras que para el vapor solamente se

Programas Auxiliares.

Los programas auxiliares son parte de Manual Azucarero 2012, y se aplican en todo cálculo de balances de masa y energía, pero también pueden ser usados individualmente para resolver casos puntuales, ya que poseen su propia interfaz.

Vapor 2.0 - En 1997, IAPWS, *International Association for the Properties of Water and Steam*, adoptó una nueva formulación para uso industrial denominada **IAPWS-IF97**. Este paquete contiene las fórmulas necesarias para las propiedades dependientes o no de los valores de presión y temperatura, y para vapor en la línea de saturación. Estas numerosas y complejas ecuaciones, agrupadas para las cinco regiones en la que se divide la carta presión-temperatura de vapor, con límites de 100 MPa y 2273.15 °K, son usadas como norma internacional y de hecho son parte de **Vapor 2.0**.

Agua y Vapor de Agua

Propiedades Termodinámicas IAPWS IF97

Datos: Presión: 21.0 bar, Temperatura: 310.0 °C

Calcular, Convertir Unidades

Propiedades	Unidades	Vapor	
Entalpia Especifica	H	kJ/kg	3044.64
Entropia Especifica	S	kJ/(kg.K)	6.78239
Calor Especifico p-cte.	Cp	kJ/(kg.K)	2.31232
Calor Especifico v-cte.	Cv	kJ/(kg.K)	1.69299
Densidad	ρ	kg/m ³	8.21380
Volúmen Especifico	v	m ³ /kg	0.12175
Viscosidad Dinámica	μ	Pa.s	2.05042E-05
Viscosidad Cinemática	ν	m ² /seg	2.49632E-06
Conductividad Térmica	λ	W/(m.K)	0.04783
Temperatura Saturación	Ts	°C	214.87
Presión Saturación	Ps	bar	98.65

Soluciones Azucaradas

Soluciones Azucaradas - Propiedades Fisicas

Datos: Brix: 15.0 %, Temperatura: 35.0 °C

Calcular, Convertir Unidades

Propiedades	Unidades		
Aumento Pto. Ebullición	Ape	°C	1.15
Entalpia	H	kJ/kg	134.55638
Calor Especifico	Cp	kJ/(kg.K)	3.84248
Calor de Solución	Hsol	kJ/kg	24.23759
Conductividad Térmica	λ	W/(m.K)	0.57049
Densidad	ρ	kg/m ³	1055.14422
Volúmen Especifico	v	m ³ /kg	9.47738E-04
Viscosidad Dinámica	μ	Pa.s	1.10704E-03
Viscosidad Cinemática	ν	m ² /seg	1.04918E-06
Solubilidad (Sacarosa)	γ	% (m/m)	69.48388
Tensión Superficial	σ	N/m	7.20257E-02

Aire Seco y Húmedo

Propiedades Termodinámicas del Aire

Datos: Presión: 1.200 bar, Temperatura Bulbo Seco: 41.50 °C, Temperatura Bulbo Húmedo: 34.30 °C, Humedad Relativa: 60.97 %

Calcular, Convertir Unidades

Propiedades	Unidades	Vapor	
Humedad Absoluta	Y	kg agua/kg aire seco	0.02634
Humedad Absoluta Saturación	Ys	kg agua/kg aire seco	0.04320
Entalpia	h	kJ/kg	109.59995
Calor Especifico p-cte.	Cp	kJ/(kg.K)	2.64096
Densidad	ρ	kg/m ³	1.30818
Volúmen Especifico	v	m ³ /kg	0.76442
Viscosidad Dinámica	μ	Pa.s	1.90450E-04
Viscosidad Cinemática	ν	m ² /seg	1.45584E-04
Temperatura de Rocio	Tr	°C	32.43
Presión de Vapor Agua	Pv	bar	0.048754
Presión Saturación	Pvs	bar	0.079958

Fig. 6 - Algunas de las interfaces de los Programas Auxiliares

Aire 1.1 - Este software fue desarrollado usando una de las ecuaciones de estado, para obtener las propiedades termodinámicas del aire. Las fórmulas son las aprobadas por la **American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)**, y están basadas en los estudios de Hyland and Wexler, "Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K, W. Hyland and A. Wexler, *ASHRAE Transactions, 89(2A) 500-519, 1983*", and "Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 K to 473.15 K, and of saturated moist air from 173.15 K to 372.15 K, at pressures to 5 MPa, R. W. Hyland and A. Wexler, *ASHRAE Transactions, 89(2A) 520-535, 1983*".

TERMO 1.1 - Software basado en **CAPE-OPEN 1.1**, plataforma estándar, abierta, desarrollada por **CAPE-OPEN Laboratories Network (Co-LAN)**, la cual permite obtener las propiedades físicas y termodinámicas de una infinidad de componentes puros y sus mezclas, para el diseño y operación de procesos químicos. El uso de esta plataforma en la industria azucarera permite desarrollar proyectos o analizarlos, en las destilerías de etanol, particularmente en la deshidratación del mismo usando ciclohexano como formador del azeótropo ternario. Es posible obtener los diagramas de equilibrio, fase líquida y/o vapor, para la mezcla etanol-agua-ciclohexano, y sus correspondientes azeótropos binarios y ternarios. Algunas otras propiedades, como como fugacidad, densidad, factor de compresibilidad, entalpías, capacidad calorífica, etc., son calculadas usando los métodos de grupos de contribución (UNIFAC, ASOG), otros modelos basados en los coeficientes de actividad (NRTL, Wilson, UNIQUAC), o en la Ecuación de Estado (Gas Ideal, Virial y Cúbica).

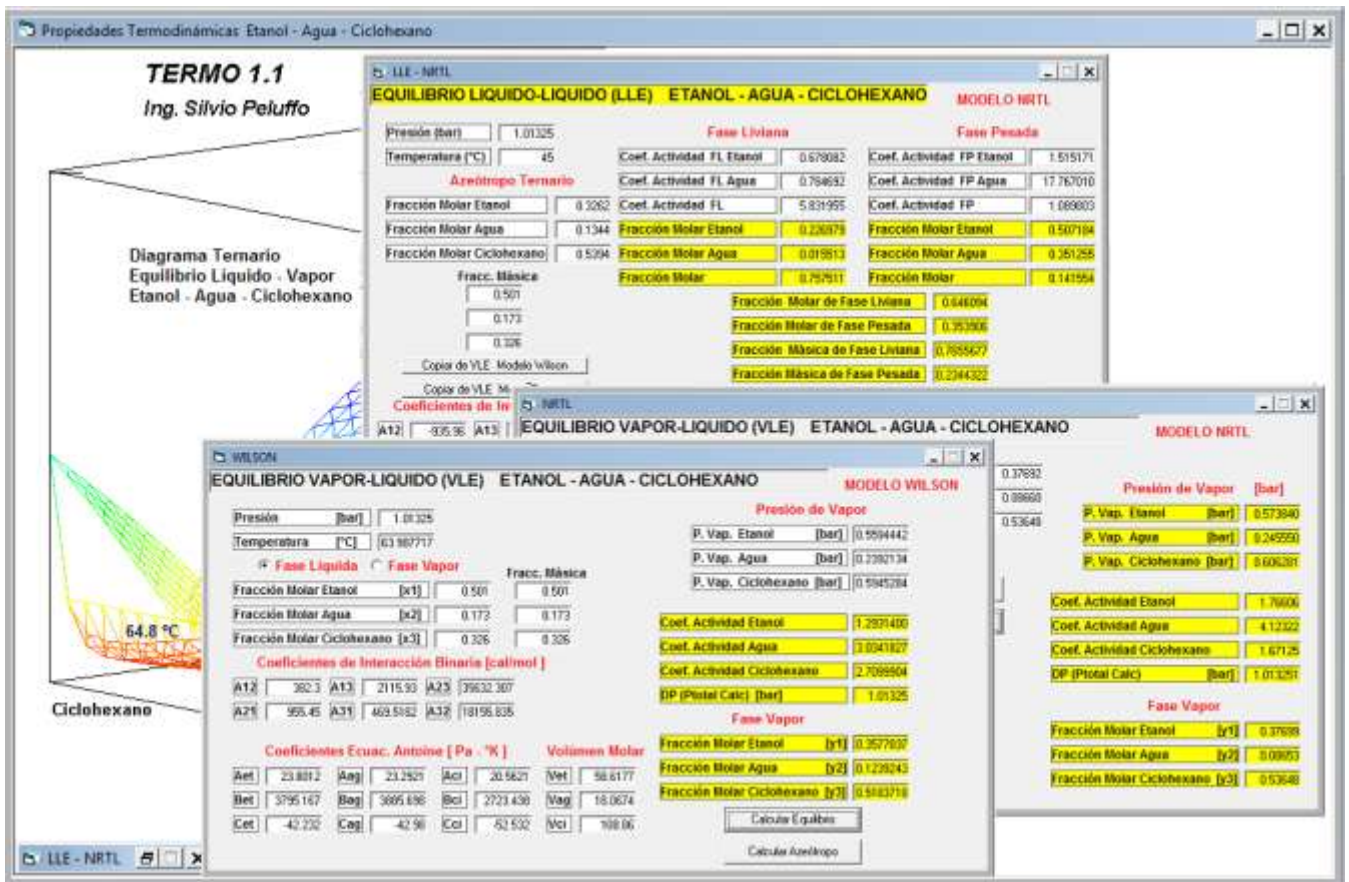


Fig. 7 – Equilibrio Líquido-Líquido y Vapor-Líquido en la mezcla etanol-agua-ciclohexano, usando los modelos Wilson and NRTL

Flujo 10 - Frecuentemente en la industria azucarera, los ingenieros necesitan efectuar cálculos para transportar por cañerías fluidos como vapor, agua, aire comprimido, jugos, mieles, melazas, etanol, gas natural, etc. . **Flujo 10** permite dimensionar los componentes necesarios para el circuito, cañerías, codos, curvas, reductores, válvulas, etc., y obtener la caída de presión para seleccionar la bomba que lo impulsará. Esta herramienta simplifica notablemente el cálculo eliminando el uso de ábacos y/o cartas (Moody Chart), usadas en un interminable trabajo manual. Una interfaz gráfica muy intuitiva permite construir un circuito isométrico aproximado, pero incluyendo todos los elementos necesarios, cañerías, codos, válvulas, etc., a partir del cual se obtiene la grilla de cálculo necesaria que usa las ecuaciones fundamentales, Bernoulli, D'Arcy-Weisbach, Colebrook-White, Hazen-Williams, Fanning, etc., para obtener la caída de presión y la potencia de la bomba. Esto permite seleccionar rápidamente el circuito más conveniente, técnica y económicamente. La selección de las cañerías y los accesorios se obtienen de una base de datos según estándares como ASME, ANSI, ASTM, AGA, API, AWWA, BS, ISO, DIN y otros.

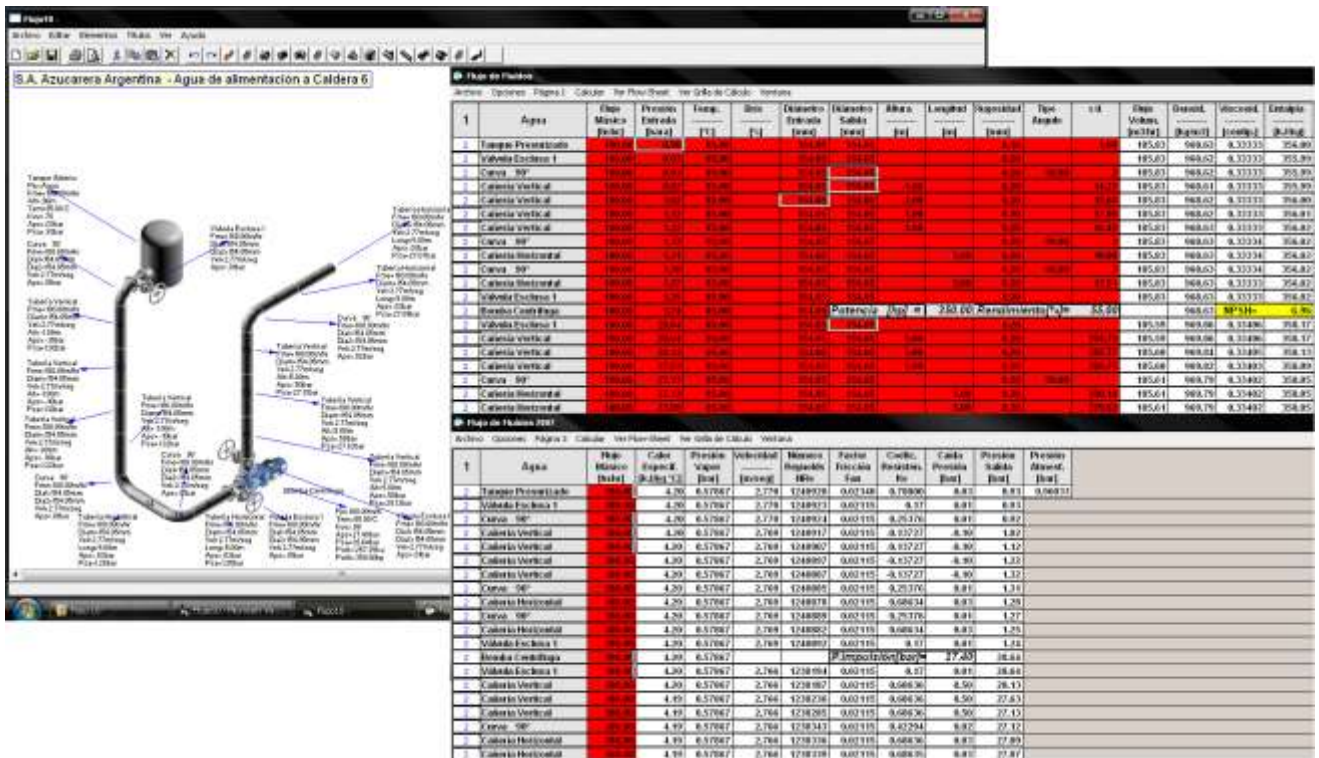


Fig. 8 - Vista isométrica del proyecto de alimentación de agua a una caldera, y su grilla de cálculo

En este supuesto caso, Fig. 8, el agua para una caldera es impulsada con una bomba centrífuga de múltiples etapas, alimentada desde un tanque en altura. El circuito consta de cañerías verticales y horizontales, accesorios y válvulas que contribuyen a la pérdida de carga total. El flowsheet se arma rápidamente, arrastrando cada elemento, cañería o accesorio, el que se posicionará automáticamente uno detrás del otro. El agua de condensados, probablemente muy caliente, debe alimentar a una caldera de presión media. El circuito lógicamente debe tener una alimentación a la bomba, positiva, cuya altura dependerá del NPSH de la bomba. Las propiedades físicas y termodinámicas del agua se calculan automáticamente en función de las temperaturas y presiones utilizadas. Las características, dimensiones de cañerías y accesorios, se obtienen de las bases de datos y cálculos normalizados, mediante interfaces muy sencillas y completas, como se muestra en la Fig. 9. El cálculo da como resultado que, para un flujo de 180 tn/hr, de agua a 85 °C, 27.7 bar, se necesita una bomba de 350 hp, tomando un 55 % de rendimiento. El NPSH de la bomba seleccionada es de 6.96 bar, según el fabricante, y será necesario una altura de alimentación de 4 mts por encima del nivel de piso para estar por debajo del NPSH de la bomba.

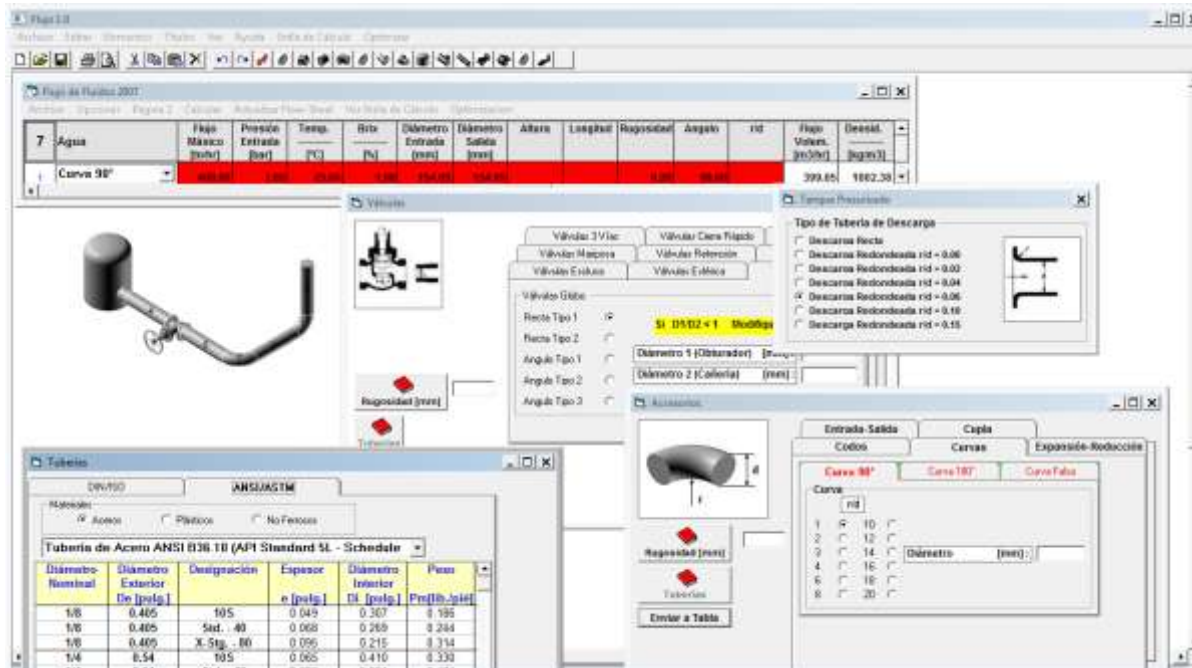


Fig. 9 – Información de algunos accesorios, cañerías y válvulas de la base de datos de Flujo 10

Flujo 10, también permite cálculos para la medición de caudales utilizando elementos e instrumentos de presión diferencial. Este desarrollo hace usos de las normas *internacionales ISO 5167-2003 International Standard, ASME MFC-14M-2003, British Standard 1042, Part 1, Section 1.2, American Gas Association Report No.3, Part 1, 3rd Ed, 1990*, y otras, para obtener el coeficiente de descarga C_d , para placas orificio (circulares, excéntricas, segmentadas), ISA Nozzles, Long Radius Nozzles, Venturis, etc. Para el caso particular de medición del consumo de gas natural, se ha implementado en **Flujo 10**, la norma **AGA 8 – 1992 (Detail Characterization Method)**, de **American Gas Association**, la cual permite calcular la densidad y el factor de compresibilidad, en base a la composición molar del gas natural con 21 componentes. La interfaz gráfica se muestra en la Fig. 10.

Toma de Presión		Toma de Brida Aguas Arriba	
Fluido		Gas Natural	
Material Cañería		Acero al Carbono	
Material Placa		Acero Inoxidable (AISI 304 - AISI 316)	
Diámetro de la Cañería	D [m]		0.102260
Diámetro de la Placa	d [m]		0.047625
Caudal Volumétrico Base	Qv [m³/s]		1.6908
Presión Diferencial	hw [Pa]		11000.00
Presión Estática de Flujo (Aguas Arriba)	Pf [Pa]		9100940.00
Temperatura de Flujo	Tf [°K]		323.15
Presión de Base	Pb [Pa]		101325.00
Temperatura de Base	Tb [°K]		288.15
Altura Sobre Nivel del Mar			
Presión Atmosférica	Paa [Pa]		101325.00
Diámetro Corregido de la Cañería	Dc [m]		0.102294
Diámetro Corregido de la Placa	dc [m]		0.047649
Relación de Diámetros	β		0.465801
Número de Reynolds (Cañería)	ReD		1877863
Coefficiente de Descarga	C_d		0.601899
Coefficiente de Velocidad	Ev		1.024403
Factor de Expansión	Y1		0.999603
Densidad de Base	ρ [kg/m³]		0.9162372
Densidad Relativa de Base	Gr		0.7455324
Densidad de Flujo	ρ [kg/m³]		90.3081913
Viscosidad de Base	μ [Pa-s]		0.0000103
Viscosidad de Flujo	μ [Pa-s]		0.0000103
Compresibilidad de Base	Zb		0.996649
Compresibilidad de Flujo	Zf		0.809863
Peso Molecular	M		21.592
Coefficiente Isoentrópico	k		1.3000

Datos - AGA 8 1992			
Presión Flujo [Pa]	9100940	Presión Base [Pa]	101325
Temperatura Flujo [°C]	50.00	Temperatura de Base [°C]	15.00
Componente	% Molar	Resultados	
Metano	73.34000	Densidad Base [kg/m³]	0.91624
Etano	6.97000	Densidad Flujo [kg/m³]	90.30819
Propano	2.28000	Densidad Molar Base [kgmol/m³]	0.04243
i-Butano	0.44000	Densidad Molar Flujo [kgmol/m³]	4.18239
n-Butano	0.76000	Densidad Relativa [0°C - 1.01325 bar]	0.74821
i-Pentano	0.28000	Densidad Relativa [15°C - 1.01325 bar]	0.74553
n-Pentano	0.24000	Densidad Relativa [20°C - 1.01325 bar]	0.74759
Hexano	0.17000	Viscosidad Base [cp]	0.00001
Heptano	0.15000	Viscosidad Flujo [cp]	0.00001
Octano	0.00000	Peso Molecular	21.59247
Nonano	0.00000	Compresibilidad Base	0.99665
Decano	0.00000	Compresibilidad Flujo	0.80986
Oxígeno	0.00000	Factor Supercompresibilidad	1.10934
Monóxido de Carbono	0.00000	Exponente Isoentrópico	1.30000
Hidrógeno	0.00000	Peso Molecular Aire	28.96250
Nitrógeno	1.58000	Compresibilidad Aire Base	0.99665
Dióxido de Carbono	2.16000		
Sulfuro de Hidrógeno	11.66000		
Argón	0.00000		
Helio	0.00000		
Agua	0.00000		
Total	100.00000		

Fig. 10 - Interfaz gráfica para el cálculo de placas orificio

Conclusiones

Manual Azucarero 2012 fue desarrollado tomando en cuenta algunos aspectos de los muy importantes softwares comerciales como SUGARS, ASPEN PLUS, HYSIS, PROSIM, SIMCAD Pro, SIMUL 8, CHEMCAD, etc., muy caros por cierto, y con dificultades para ser utilizados plenamente en la industria azucarera (excepto SUGARS). Manual Azucarero 2012, pretende ser una alternativa más específica utilizando modelos matemáticos rigurosos especialmente desarrollados para esta industria, con aplicación directa en las distintas áreas productivas, ya sea en diseño y/o evaluación, simulando esquemas que permitan optimizar el proceso. El uso en el área académica, facilitaría la tarea de aprendizaje de los estudiantes avanzados de ingeniería azucarera.

REFERENCIAS

ASHRAE Headquarters ,1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, <http://www.ashrae.org>.
ASME, American Society of Mechanical Engineers, <http://www.asme.org>.
Aspen Plus, Aspen HYSYS, Aspen Technology, <http://www.aspentech.com>.
CAPE-OPEN Laboratories Network (CO-LaN), <http://www.colan.org>.
ProSim SA, <http://www.prosim.net/fr>.
Spang Bernhard, Equations of IAPWS-IF97, <http://www.cheresources.com/iapwsif97.shtml>.
Sugars International, LLC, <http://www.sugaronline.com>.
TEMA Tubular Exchanger Manufacturers Association, <http://www.tema.org>.

APENDICE

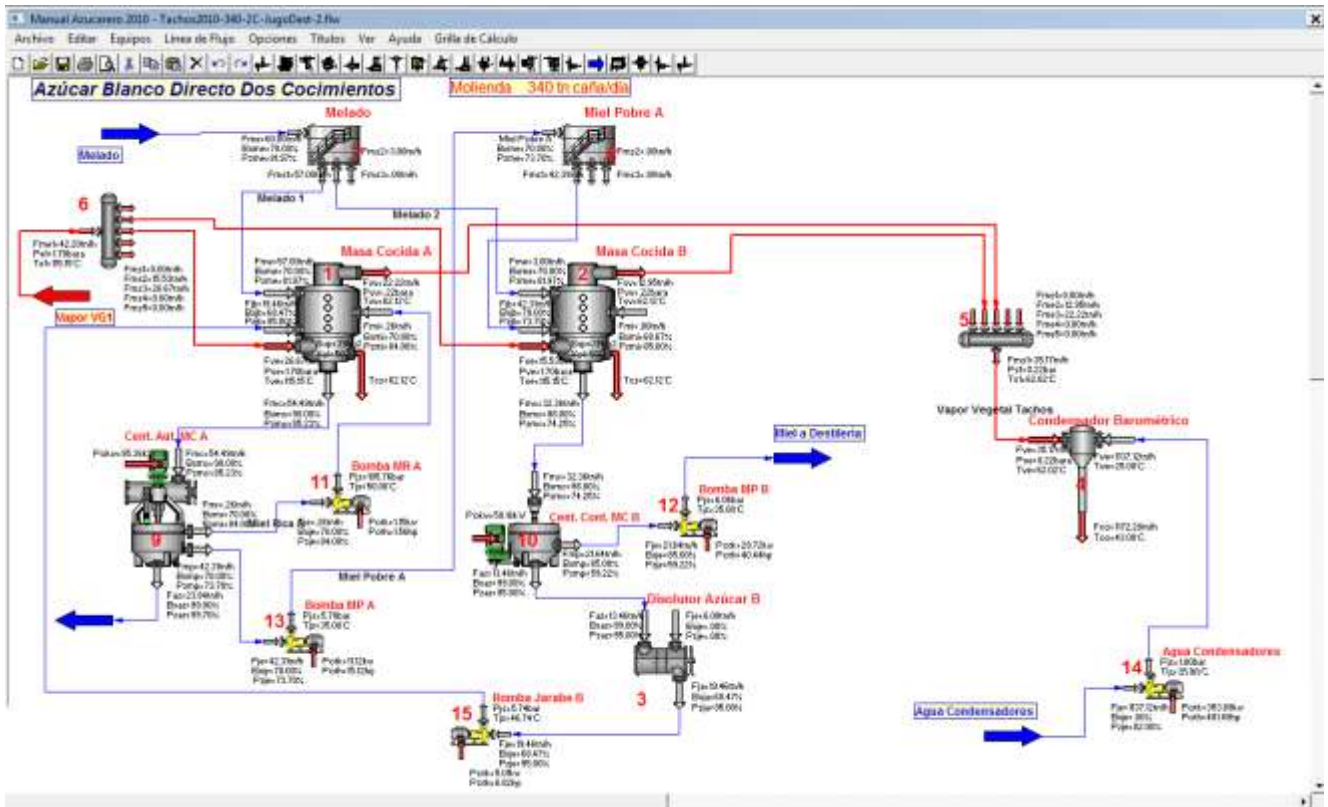


Fig. 11 - Azúcar Blanco Directo , esquema de dos cocimientos con miel final de alta pureza para Destilería

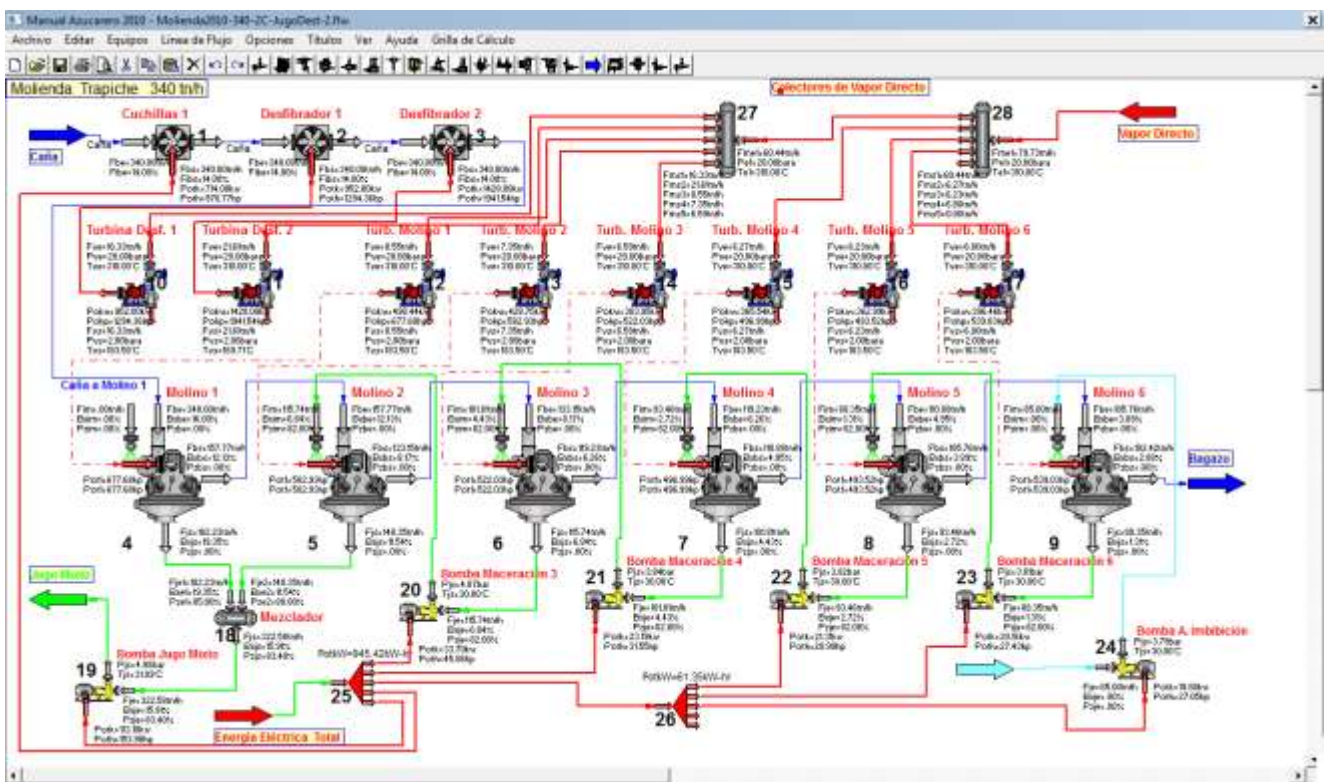


Fig. 12 - Balance de Masa y Energía y determinación del ajuste óptimo de los Molinos