

***ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA
DETECCIÓN DE INCONGRUENCIAS EN EL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO
DE PROCESOS QUÍMICOS***

EVERTH ALFONSO VARGAS RUBIO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2019**

***ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA
DETECCIÓN DE INCONGRUENCIAS EN EL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO
DE PROCESOS QUÍMICOS***

EVERTH ALFONSO VARGAS RUBIO

**Trabajo de investigación presentado para obtener el título de:
*Magíster en Ingeniería Química***

Director:

**Fredy Augusto Avellaneda Vargas
PhD en Ingeniería Química, Ambiental y de Procesos**

Codirectores:

**Debora Alcida Nabarlatz
PhD en Ingeniería Química y de Procesos**

**Iván Darío Ordóñez Sepúlveda
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2019**

Este proyecto de investigación se lo dedico principalmente a mis padres Nancy y Ever, mis hermanas Kiara y Michell, mi tata Dora, mi abuelo Alfonso, mi madrina Astrid, mi sobrino Salomón y al resto de mi familia, con su apoyo incondicional pude culminar valientemente esta etapa de mi vida, siempre están en mi corazón y mente.

BD todo esto es por ti, por ambos, a ti y a tus padres Yamile y Ángel, tu hermana Diana y tus adorables sobrinos JuanDi y Pipe, a quienes quiero como si fueran los míos, les dedico este logro.

A mis amigos de siempre Tania, Yhitzak y Nini, gracias por estar ahí de manera incondicional y perdonen mi ingratitud, de verdad los quiero.

A los nuevos amigos que hice durante el desarrollo de esta tesis, Fabio, Julio y Camilo G, con su presencia esto fue mucho más ameno y divertido.

A mis consentidos Ares, Isis, Lilith y Simón, porque en la noche y la soledad su presencia me reconforta, me tranquiliza y me hace feliz.

A mi amigo Luckas (†), en la madrugada sigo extrañando esas conversaciones tan interesantes que solíamos tener.

Por siempre a la escritora británica Virginia Woolf (†), porque en sus libros dejó consignadas las palabras y las historias que han sido guía en mi desarrollo personal, enseñándome a amar la vida.

A la Oruga copo (†) que casi me mata, me hiciste padecer un intenso dolor y yo fui el autor intelectual de tu deceso, estamos a mano.

Me cogieron sentimental.

Everth Vargas (Pocho, Zeto, Alph y todos al tiempo).

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Fredy Avellaneda por depositar nuevamente su confianza en mí, dirigir mi proyecto de investigación y brindarme apoyo durante su desarrollo.

Al ingeniero químico Iván Ordóñez por ser el guía irremplazable en el desarrollo de esta tesis, por permitirme emprender otro proyecto más en su compañía y por compartirme su conocimiento, con sus valiosas enseñanzas profesionales y de vida.

A la doctora Debora Nabarlatz por sus valiosos aportes, necesarios para cumplir satisfactoriamente con los objetivos de este proyecto.

Al Grupo de Investigación en Tecnologías de valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e industriales para la sustentabilidad Energética (INTERFASE) y a mis estudiantes de pregrado y ahora colegas Karen, Sol, Karol, Camila, Laura y Paula, por darme la oportunidad de ser su codirector o guía en sus respectivos proyectos de investigación.

A mis amigos y colegas Tania y Yhitzak y a los ingenieros Oscar Salazar y Rocío Ordóñez, quienes hicieron un pequeño aporte en el desarrollo de esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS.....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos	20
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	21
Simulación de procesos.....	22
Simuladores comerciales de procesos	23
Reglas de heurística para el diseño de procesos	28
Topología de procesos químicos	30
CAPÍTULO 1. DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO DE CÓMPUTO PARA LA DETECCIÓN DE INCOHERENCIAS Y ERRORES PRESENTES EN LOS DISEÑOS DE PROCESOS QUÍMICOS	32
1.1. INTRODUCCIÓN.....	32
1.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	33
1.2.1. Revisión del estado del arte	33
1.2.2. Organización y clasificación de las reglas de heurística	33
1.2.3. Diseño del algoritmo de detección de incongruencias	34
1.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	36
1.3.1. Revisión bibliográfica y clasificación de las reglas de heurística	36
1.3.2. Programación del algoritmo preliminar	45

1.3.3. Diseño y programación del algoritmo de detección de errores.	46
1.3.4. Comandos programados para el ingreso y evaluación de reglas de heurística	57
1.3.5. Análisis de los algoritmos adicionales.....	60
1.3.6. Análisis de la capacidad del algoritmo de detección de errores.....	62
1.4. CONCLUSIONES.....	63

CAPÍTULO 2. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE INCONGRUENCIAS.65

2.1. INTRODUCCIÓN.....	65
2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	65
2.2.1. Diseño y desarrollo de la interfaz del menú principal	65
2.2.2. Diseño y desarrollo de la interfaz del menú de opciones adicionales	66
2.2.3. Diseño y desarrollo del reporte gráfico de incongruencias.....	67
2.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	67
2.3.1. Interfaz del menú principal	67
2.3.2. Interfaz del menú de opciones adicionales	70
2.3.3. Reporte gráfico	72
2.4. CONCLUSIONES.....	90

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA.....91

3.1. INTRODUCCIÓN.....	91
3.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	92
3.2.1. Evaluación interna.	92
3.2.2. Evaluación externa.	93
3.2.3. Correcciones y mejoras.	93

3.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	94
3.3.1. Análisis de la evaluación interna.....	94
3.3.2. Análisis de la evaluación externa.....	98
3.3.3. Acciones correctivas y arreglos finales.	105
3.4. CONCLUSIONES.....	106
4. CONCLUSIONES GENERALES	108
5. RECOMENDACIONES.....	110
REFERENCIAS	111
BIBLIOGRAFÍA.....	116
ANEXOS.....	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales simuladores de procesos.	24
Tabla 2. Bibliografía utilizada para la selección de las reglas de heurística.	37
Tabla 3. Desempeño típico de diversos tipos de bombas. Ejemplo de reglas de heurística halladas en <i>Walas et al.</i>	37
Tabla 4 Reglas de heurística para bombas centrífugas verticales a distinta capacidad de flujo. Fuente: Tomado y modificado de <i>Walas et al.</i> [34].	39
Tabla 5. Materiales de construcción de bombas. Ejemplo de las reglas de heurística halladas en <i>Branan</i> [39]	40
Tabla 6. Datos de bombas para aplicar heurística de presión máxima.	47
Tabla 7. Datos de bombas para aplicar heurística de cálculo de potencia.	48
Tabla 8. Valores de la potencia y de las variables de la ecuación de bombas centrífuga y reciprocante.	49
Tabla 9. Datos de tanques para aplicar heurística de relación longitud/diámetro..	50
Tabla 10. Datos de torres para aplicar heurística de relación longitud/diámetro. ..	52
Tabla 11. Relación entre el material de construcción de las bombas y la naturaleza del fluido.	54
Tabla 12. Datos de material de construcción y naturaleza de fluido para las bombas del ejemplo.	54
Tabla 13. Propiedades de flujo y presión para las bombas del ejemplo.	56
Tabla 14. Casos de estudio de procesos químicos tomado de la literatura.	92

Tabla 15. Casos de estudio de la asignatura de Análisis de Procesos del programa de Ingeniería Química de la UIS.....	92
Tabla 16. Resumen de los errores encontrados en los casos de estudio de la evaluación interna.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Prototipo de formato de tabla de corrientes.	35
Figura 2. Prototipo de formato de tabla de equipos.	36
Figura 3. Esquema de clasificación del ejemplo de la bibliografía de Walas [34].	41
Figura 4. Esquema de clasificación del ejemplo de la bibliografía de <i>Branan</i> [39].	42
Figura 5. Esquema de clasificación del ejemplo de la bibliografía de <i>Turton</i> [40].	42
Figura 6. Clasificación general de las reglas de heurística.	43
Figura 7. Sección del diagrama de flujo del proceso de producción de benceno.	53
Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de contradicciones.....	61
Figura 9. Ventana de inicio de la interfaz de la herramienta informática.....	68
Figura 10. Interfaz del menú principal del AUDIPRO.	69
Figura 11. Menú de funciones adicionales de AUDIPRO.....	71
Figura 12. Ejemplo de reporte de generalidades del AUDIPRO.	73
Figura 13. Ejemplo de reportes de errores en los balances en masa del AUDIPRO.....	76
Figura 14. Reporte de inconsistencias en los datos ingresados del AUDIPRO. ...	78
Figura 15. Ejemplo de Reporte de inconsistencias heurísticas halladas en AUDIPRO.....	79
Figura 16. Ejemplo de reporte de cantidad de errores por tipo de equipo.	80
Figura 17. Ejemplo de cantidad de errores por subtipo de equipo.	81
Figura 18. Ejemplo de reporte de cantidad de errores por propiedad de equipo. .	82

Figura 19. Ejemplo de reporte de cantidad de errores para bombas.	83
Figura 20. Ejemplo del reporte de contradicciones en las heurísticas evaluadas.	84
Figura 21. Ejemplo 1 de detalle de inconsistencias en bombas.....	86
Figura 22. Ejemplo 2 de detalle de inconsistencias en bombas.....	87
Figura 23. Ejemplo1 de detalle de inconsistencias en recipientes de procesos....	88
Figura 24. Ejemplo 2 de detalle de inconsistencias en recipientes.	89
Figura 25. Resultados de la encuesta sobre el desempeño del AUDIPRO en la primera sesión.	100
Figura 26. Resultados de la encuesta sobre el reporte de resultados del AUDIPRO en la primera sesión.....	101
Figura 27. Resultados de la encuesta sobre el desempeño del AUDIPRO en la segunda sesión.....	103
Figura 28. Resultados de la encuesta sobre el reporte de resultados del AUDIPRO en la segunda sesión.	104

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Tabla de tipos y subtipos de equipos implementados en los formatos de la tabla PFD de equipos del AUDIPRO.....	121
ANEXO B. Formatos de tablas PFD de corrientes y equipos (ejemplo diligenciado)	122
ANEXO C. Clasificación y organización de las reglas de heurística implementadas en el programa.....	125
ANEXO D. Formato de implementación de reglas de heurísticas	139
ANEXO E. Diagrama de flujo general de AUDIPRO.....	140
ANEXO F. Manual del usuario para el uso de AUDIPRO	141
ANEXO G. Evidencia de la evaluación de los casos de estudio.....	141
ANEXO H. Encuesta aplicada a los estudiantes	142
ANEXO I. Resultados generales de la encuesta	146
ANEXO J. Acciones correctivas	150

RESUMEN

TÍTULO: ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA DETECCIÓN DE INCONGRUENCIAS EN EL DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE PROCESOS QUÍMICOS *

AUTOR: Vargas-Rubio, Everth Alfonso **

PALABRAS CLAVES: Simulación, diseño de procesos, reglas de heurística, simuladores de procesos

DESCRIPCIÓN:

Los simuladores de procesos presentan errores que no suelen tenerse en cuenta, y por ende podrían afectar el diseño de un proceso. Existen reglas de heurística que permiten realizar diseños más acordes con la práctica y no suelen ser verificadas por los simuladores de procesos. Por este motivo, en este proyecto se desarrolló una herramienta informática que permite revelar incongruencias en las variables de operación y en el diagrama de flujo de un proceso químico.

Se realizó una recopilación y clasificación detallada de reglas de heurística usadas para el diseño de equipos y procesos. Se establecieron estrategias de sistematización para programar un algoritmo que evalúa los distintos tipos de heurística encontrados, usando programación en Microsoft Visual Basic®. Se diseñó una interfaz gráfica para facilitar con ello el uso de la herramienta y la lectura de los resultados entregados.

La herramienta fue sometida a un proceso de evaluación interna con seis procesos como casos de estudio. Posteriormente se realizó una evaluación externa con estudiantes para evidenciar el correcto funcionamiento de la herramienta, y se aplicó una encuesta con el fin de evaluar su utilidad y eficiencia. Se concluyó que la herramienta permite detectar errores en los intervalos de operación de las variables del proceso, fallas en el diseño de los equipos, algunos errores de topología básica, falencias en los balances de masa, entre otros.

* Trabajo de investigación de Maestría en Ingeniería Química

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Fredy Augusto Avellaneda. Codirectores: PhD. Debora Alcida Nabarlatz, Ing. Iván Darío Ordóñez

ABSTRACT

TITLE: ELABORATION OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR THE DETECTION OF INCONSISTENCIES IN THE CONCEPTUAL AND BASIC DESIGN OF CHEMICAL PROCESSES *

AUTHOR: Vargas-Rubio, Everth Alfonso **

KEY WORDS: Simulation, process design, rules of thumbs, process simulators

DESCRIPTION:

Process simulators include errors that are not usually considered, and therefore could affect the design of a process. There are rules of thumb that allow to make designs more in line with the practice and are not usually verified by process simulators. For this reason, in this project a computer tool was developed that allows to reveal inconsistencies in the operation variables and in the flow diagram of a chemical process.

We carried out a detailed compilation and classification of rules of thumbs used for the design of equipment and processes. Systematization strategies were established to program an algorithm that evaluates the different types of heuristics found, using programming in Microsoft Visual Basic®. A graphic interface was designed to facilitate the use of the tool and the reading of the generated results.

The computer tool was subjected to an internal evaluation with six processes as case studies. An external evaluation was carried out with students, applying a survey to demonstrate the correct functioning of the tool and to conclude about its utility and efficiency both in the academics and industry. The evaluation demonstrated that the tool detects errors in the operation intervals of the process variables, as well as miscalculates dimensioning equipment, some topology errors of process plants and flaws in mass balances, among others.

* Master's research in chemical engineering

** Faculty of physicochemical engineering. School of Chemical Engineering. Director: PhD. Fredy Augusto Avellaneda. Codirectors: PhD. Debora Alcida Nabarlatz, Ing. Iván Darío Ordóñez

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de la industria de procesos es desarrollar productos de alta calidad con el máximo beneficio económico [1]. Por consiguiente, una de las principales labores de los ingenieros químicos está dirigida hacia el diseño de procesos [2], donde se toman decisiones fundamentales en el desarrollo de los diagramas de flujo de una planta y se determinan sus condiciones de funcionamiento [3]. Además, se busca que los procesos logren ser flexibles en términos de operación y ante variaciones del mercado, obedeciendo principios de desarrollo sostenible y las políticas de protección ambiental [1].

Los programas de simulación permiten modelar y analizar diseños de procesos en tiempos relativamente cortos. Esto se logra mediante balances de masa y energía que facilitan el cálculo de variables como presiones, temperaturas y velocidades de flujo, permitiendo además la evaluación de los fenómenos presentes en el proceso, como el equilibrio de fases y la cinética química [4]. Así, se supone que pese a que el diseñador debe conocer los modelos y ecuaciones necesarios para poder utilizar los simuladores adecuadamente, podría prescindir del conocimiento profundo de las leyes teóricas que describen el proceso [5], debido a que el programa se encarga de converger el proceso simulado, según la información correspondiente a las corrientes de alimento, los parámetros de operación y algunos resultados deseados.

Mediante el uso de los simuladores comerciales, se pueden evaluar diferentes alternativas y escenarios de operación de una planta en desarrollo, con el fin de escoger la mejor estructura de diseño y las condiciones de operación más adecuadas [6]. Además, algunos simuladores proporcionan el dimensionamiento de los equipos del proceso, o en su defecto, los datos requeridos para un posterior diseño detallado de los mismos. Estas ventajas le permiten al ingeniero químico efectuar los análisis de factibilidad técnica y económica de los proyectos que

quiera desarrollar, y convierten a los simuladores de procesos en herramientas indispensables para la industria y la academia modernas [7].

Sin embargo, en el diseño de procesos es imperativo constatar que los equipos estén diseñados correctamente y que la topología de la planta sea la adecuada., para evitar el uso de corrientes de reflujo y la inclusión de equipos que realicen operaciones innecesarias, que hagan ineficiente el proceso. Pasar por alto dichas labores, podría ocasionar incongruencias que aumenten considerablemente el costo de inversión y operación de una planta de procesos, así como potenciales problemas de seguridad e impacto ambiental. Muchas de estas incongruencias no se reportan en los simuladores comerciales, dado que estos hacen uso de balances macroscópicos aplicados a cada equipo de forma individual, pero no aplican la lógica del proceso en forma conjunta. Esto quiere decir que los simuladores analizan el proceso como piezas individuales que deben converger en serie, sin importar qué sucede más allá del equipo inmediatamente anterior o posterior que se está diseñando; sin evaluar la topología estructural de la planta como un todo.

Es importante considerar que los simuladores no aplican reglas de heurística de diseño a la par con la simulación, esto suele ser realizado por el ingeniero como una actividad posterior a la obtención de los resultados de una simulación de un programa comercial. En consecuencia, es posible obtener procesos fallidos, que estimen, ya sea por arriba o por debajo, las capacidades de los equipos con respecto a los que son fabricados regularmente y se encuentran en el mercado. Por otra parte, con el fin de alcanzar una máxima conversión o eficiencia del proceso, los simuladores pueden dar soluciones que son absurdas en la práctica y que al pasar inadvertidas podrían afectar la economía, la seguridad del proceso y perjudicar el medio ambiente.

Es importante recalcar que, tanto en el ejercicio académico como en la industria es frecuente encontrar errores en los diseños de procesos que corresponden a fallas

en la simulación, pese a que estas converjan en su totalidad. Dichos errores son difícilmente percibidos por estudiantes o por ingenieros con poca experiencia en el diseño de procesos, ya que pasan por alto la aplicación de reglas de heurística y conocimientos prácticos, impidiendo desarrollar un diseño viable para llevarlo a cabo en la realidad.

Actualmente no existe un método genérico que evalúe la consistencia de los factores que afectan el diseño, la puesta en marcha del desarrollo de la planta y su posterior operación. Por este motivo, en el desarrollo de este proyecto se elaboró una herramienta informática complementaria a los procedimientos clásicos de diseño de procesos industriales y a los programas de simulación, que integra un algoritmo de cómputo con la capacidad de revelar incongruencias en las variables de operación y en la topología de la estructura de los procesos químicos y que a su vez sirva como herramienta de apoyo en el ejercicio académico de estudiantes y docentes, complementando el aprendizaje.

El algoritmo tiene la capacidad de sistematizar los distintos tipos de reglas heurísticas de dimensionamiento, configuración de equipos y topología de plantas químicas, incluyendo algunas reglas de heurística básica predeterminadas, partiendo de las tablas PFD (Process fluid diagram) de corrientes y de equipos, propias de cualquier diseño de un proceso; además permite la evaluación de los límites de permisibilidad para el control ambiental y seguridad industrial. Dicho algoritmo se integró a una interfaz gráfica e interactiva, lo que conforma una herramienta que tiene la habilidad de evaluar varios aspectos del diseño conceptual y básico de un proceso, con calidad, facilidad y rapidez.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una herramienta informática complementaria a los procedimientos clásicos de diseño de procesos químicos industriales, con el fin de revelar incongruencias en las variables de operación y otras características de un proceso en desarrollo.

Objetivos específicos

1. Construir un algoritmo de cómputo para la detección de incoherencias y errores presentes en los diseños de procesos químicos, que además detecte contradicciones en las reglas de heurística que se usan para establecer los límites de las variables del proceso, el dimensionamiento de los equipos típicos en la industria y la topología de plantas.
2. Elaborar una interfaz interactiva que permita aplicar con facilidad el algoritmo de detección de errores, implementando a su vez la posibilidad de incluir nuevas reglas de heurística particulares del diseño específico de un proceso cualquiera.
3. Evaluar el funcionamiento del algoritmo, mediante su aplicación en casos de estudio de diseños de procesos reales y en el ejercicio académico de las asignaturas de diseño del programa de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Los procesos están sujetos a las perturbaciones externas en el tiempo y a la incertidumbre de las premisas con que se diseñaron tales procesos. Asimismo, es imprescindible realizar previamente el análisis exhaustivo del diseño antes de construir un equipo o planta química [8]. Este análisis se hace mediante el uso de procedimientos metodológicos que representan la funcionalidad y los efectos de las variables del proceso, tanto en la ejecución del proyecto, como en la instalación y la operación de la planta y su relación con el entorno. Las consecuencias de no hacerlo pueden acarrear riesgos laborales, económicos, operacionales, de infraestructura y en la comunidad [9].

Particularmente, la labor del ingeniero químico en el diseño de procesos está dirigida hacia la creación del diagrama de flujo del proceso, partiendo de las materias primas en las corrientes de alimentación, pasando por la aplicación de una ruta de síntesis o tecnología de producción hasta llegar a un producto final deseado [10,11]. Diseñar una planta de procesos químicos, implica tomar decisiones entre un gran número de opciones en un entorno de incertidumbre, con el fin de optimizar costos, disminuir los riesgos, aumentar la seguridad industrial y maximizar la producción [12].

Anteriormente, en el diseño de procesos tradicional, se priorizaban los criterios técnicos y económicos para la recolección de datos, la síntesis de la hoja de corrientes, el modelamiento y la optimización. Dado el incremento de las preocupaciones ambientales y las nuevas políticas gubernamentales, el diseño de una planta debe realizarse conciliando los criterios mencionados en un marco de protección ambiental y de desarrollo sostenible [13]. No obstante, la labor de un diseñador de procesos es cumplir no sólo con la funcionalidad, la eficiencia y los criterios de sostenibilidad, sino considerar otras limitaciones que podrían traer consecuencias desfavorables. Por ejemplo, trabajar a una baja conversión podría

mejorar la selectividad, pero posiblemente aumentaría costos en la implementación de equipos y corrientes de recicló. Por otra parte, usar biomasa es ventajoso por ser un recurso renovable, pero implica frecuentemente una química compleja con muchos subproductos e impurezas, lo que añade costos adicionales al manejo de residuos y emisiones [2]. Además, el diseñador debe asegurar todos estos aspectos en una estructura flexible y controlable que se adapte a la dinámica del entorno.

Todo lo anterior supone una labor dispendiosa y compleja que requiere tiempo y experiencia para obtener un diseño viable. Finalmente, tener una sola opción de diseño no se considera suficiente, ya que puede contener defectos potencialmente solucionables mediante otras rutas de ejecución. Por esto, el ingeniero que diseña debe contar con alternativas de diseño, con el fin de escoger la más adecuada según los objetivos planteados y la realidad de los procesos [11].

Simulación de procesos

La simulación de procesos es la práctica por medio de la cual se puede analizar y estudiar el diseño de un modelo físico o matemático que representa un sistema real [14].

En ingeniería de procesos, la simulación abarca desde la investigación y el diseño del diagrama de flujo, hasta la operación del mismo [15]. Pese a esto, al simular un proceso no sólo se incide sobre el desarrollo de un diagrama de flujo eficiente y un producto de calidad, también sobre análisis económicos y otros aspectos de la compañía [16]. De manera que la simulación puede enfocarse en dos ámbitos [14]:

1. El diseño de un proceso, donde el objetivo es desarrollar un diagrama de flujo que satisface un conjunto específico de requisitos; la simulación se utiliza para la predicción del comportamiento del proceso que se planea llevar a la realidad.

2. El análisis de procesos ya establecidos (al menos su modelo o representación), el objetivo es utilizar la simulación con el fin de analizar la forma en que la planta se comporta bajo un conjunto dado de condiciones.

Es importante tener en cuenta que la simulación es sólo una representación aproximada de la realidad, a un cierto nivel de precisión y no la realidad misma. Es por ello, que el diseñador siempre debe ser capaz de evaluar la fiabilidad de los resultados entregados por la simulación [17].

Simuladores comerciales de procesos

Actualmente, los ingenieros químicos elaboran la mayor parte del trabajo de diseño en computadoras, haciendo uso de métodos sistemáticos y de poderosas herramientas de simulación [8,18].

Las herramientas informáticas de simulación son conocidas como simuladores de procesos o simuladores de diagramas de flujo de procesos. En estos vienen incluidos extensos paquetes de datos con las constantes de propiedades termofísicas y de transporte para miles de sustancias. Adicionalmente, contienen modelos fisicoquímicos y termodinámicos de muchos reactores y demás operaciones unitarias, teniendo en cuenta los balances de materia y energía, así como las ecuaciones de operación y de dimensionamiento de los equipos [5]. Incluso, algunos permiten calcular medidas de rentabilidad económica del proceso y realizar análisis de incertidumbre y de gestión de riesgos [19].

El éxito o falla en un proceso simulado depende de la capacidad del usuario para evaluar críticamente y sacar provecho de los resultados de la simulación [20,21], mas no necesariamente de un inadecuado desempeño del simulador [15,22]. Bien utilizados, los simuladores pueden calcular desde el calor de las reacciones, hasta

el desempeño de separadores multicomponentes a varias temperaturas y presiones, entre muchas otras variables [19].

Los simuladores de procesos más reconocidos y utilizados en la industria de procesos químicos son los siguientes [19]: ASPEN PLUS (Aspen Technology, Inc.), ASPEN HYSYS (Aspen Technology, Inc.), BATCH FRAC (Cambridge-MA/USA), PRO/II (Simulation Sciences, Inc.), CHEMCAD (ChemStations, Inc.) y BATCHPRO DESIGNER (Intelligent, Inc.). En la Tabla 1 se enlistan los simuladores de procesos químicos más usados en la actualidad y se describen brevemente las aplicaciones más relevantes para cada uno.

Tabla 1. Principales simuladores de procesos.

Principales simuladores de procesos comerciales.	Software	Aplicaciones
1. Aspen Tech, Cambridge-MA/USA	Aspen Plus	Diagramación de procesos, dimensionamiento, costeo
	Aspen Dynamics	Simulación dinámica, sistemas en tiempo real
	Advent	Integración energética
	Split	Sistemas de destilación no ideales
	Bijac	Diseño de intercambiadores de calor
	Polymer Plus	Procesos poliméricos
	BatchFrac	Procesos discontinuos y semicontinuos
	Hysys	Combina estado estacionario y simulación dinámica
	Concept	Sistemas de destilación no ideales
	Hyprop	Termodinámica
2. Chemstations, Houston-USA	ChemCad	Diagramación de procesos, dimensionamiento, costeo

Fuente: Tomado y modificado de Dimian *et al* [15]

Tabla 1. Principales simuladores de procesos (continuación).

Principales simuladores de procesos comerciales.	Software	Aplicaciones
3. Simulation Science, Los Angeles-USA	Pro II	Diagramación de procesos, dimensionamiento
	Provision	Entorno gráfico
	Hextran	Integración energética
	Datacon	Conciliación de datos
	ROMeo	Modelado riguroso on-line
4. WinSim, Houston-USA	Design II	Diagramación de procesos, dimensionamiento
5. Imperial College, London-UK	g_PROMS	Simulación dinámica
6. Bryan Research & Engineering	Prosim	Diagramación de procesos
	Tsweet	Purificación de Gas
7. KBC/Linnhoff March	Supertarget	Integración energética
8. Intelligent, Scotch Plains, NJ-USA	BatchPro	Programación y diseño de
	Desginer	procesos discontinuos

Fuente: Tomado y modificado de Dimian *et al* [15]

Es importante que el diseñador tenga presente las habilidades de los simuladores, pero también sus limitaciones, ya que desde los años noventa autores como Sadeq [23] y Kister [24,25] empezaron a publicar sobre los errores presentes en los simuladores de procesos y los problemas que estos podrían ocasionar [26], tales como seleccionar un paquete de fluidos errado, escoger mal el plato de alimentación o asignar a una torre un número de platos no conveniente. También se resalta el hecho de no tener en cuenta los intervalos de las propiedades de los equipos en relación con su operación y la disponibilidad en el mercado. A continuación, se mencionan las ventajas y desventajas más relevantes de los simuladores de procesos [15,19,20,27–29].

Ventajas

- Permiten modelar y simular diagramas de flujo de procesos en mucho menos tiempo que su realización manual, lo cual permite la evaluación de varias alternativas de diseño.
- Es relativamente sencillo cambiar de un simulador al otro una vez los principios de los simuladores de procesos son los mismos.
- Pueden incluir actividades computacionales adicionales, como simulación molecular y dinámica de fluidos computarizada.
- Permite la adaptación y optimización de las operaciones de la planta, en tiempo real, sin poner en riesgo el proceso físico.
- No requieren de hardware ni infraestructura computacional de alta gama para su ejecución.
- La mayoría de los simuladores poseen una opción de trabajo por vía de red local, lo que se acomoda al ambiente globalizado actual, facilitando el acceso desde oficinas remotas.
- Permiten la simulación de procesos específicos y predicen su comportamiento operacional en relación con los cambios de los demás procesos o variables de la planta.
- Permiten estudiar los cambios potenciales de las condiciones operativas de la planta al implementar corrientes de reciclo con el fin de mejorar la rentabilidad.
- Facilita la posibilidad de determinar parámetros de diseño, aun cuando el diagrama de flujo está incompleto.

Desventajas

- Normalmente los simuladores no efectúan análisis topológicos sobre la configuración de la estructura de la planta. En consecuencia, no es fiable que el diagrama de flujo del proceso simulado sea el óptimo [20,25,28].

- Pueden presentar incongruencias en las propiedades de las corrientes de entrada y de salida de equipos, ocasionada por la permisividad en el uso de modelos termodinámicos que podrían no ser los adecuados para todas las condiciones de operación que el diseñador desea obtener [30].
- No reportan la inclusión o exclusión de equipos y corrientes innecesarios en el diagrama de flujo. Inclusive, algunos simuladores exigen presencia de corrientes de masa en fase líquida y vapor que en la vida real nunca podrían coexistir.
- La evolución de los simuladores se encuentra limitada por el nivel de desarrollo tecnológico del software.
- La complejidad de algunos paquetes termodinámicos hace necesario que el usuario posea experiencia suficiente para la aplicación de estos.
- Es común que el desarrollo de los bancos de datos y modelos sean orientados hacia los procesos petroquímicos y de escala industrial ampliamente utilizados a nivel mundial, dejando de lado algunas funciones relevantes para otras áreas de la industria.
- No aplican las reglas de heurística de dimensionamiento de equipos a la par con la simulación, lo que genera fallas en el diseño al sobreestimar o subestimar la capacidad de los mismos [31].
- Presentan varios errores conceptuales al diseñar sistemas separación como columnas de destilación y reactores químicos[20,24,28,30,31], por ejemplo, permiten realizar torres de platos con eficiencia del 100% en cada plato.
- Para alcanzar la máxima eficiencia del proceso, los simuladores permiten excederse en el uso de condiciones extremas de temperatura y presión, en las corrientes y en las variables de operación de los equipos.
- Suelen ignorar los límites permisibles por la normatividad ambiental y de seguridad, afectando la definición de las condiciones adecuadas de funcionamiento.
- No implementan restricciones de acuerdo con la tecnología de la síntesis del producto y la naturaleza de las corrientes.

- Al finalizar casi siempre es posible hacer converger una simulación, aun cuando incluya errores teóricos o heurísticos.

Reglas de heurística para el diseño de procesos

El uso de reglas de heurística podría ayudar a mejorar el diseño de los procesos, evitando que estos presenten incongruencias en las propiedades de las corrientes, el dimensionamiento de los equipos y en la estructura topológica global de la planta. Existen reglas generales que evalúan materiales de construcción, diseño, dimensionamiento, topología y configuración de equipos y operaciones unitarias, las cuales pueden ser aplicadas sobre cualquier proceso. Por otra parte, existen algunas reglas heurísticas particulares que tienen que ver con la ruta de síntesis o la tecnología del proceso, siendo aplicables únicamente para cada proceso en específico.

Las reglas de heurística pueden evaluar variables continuas como la temperatura de una corriente o discretas como el voltaje de un impulsor, estudiar propiedades cuantitativas o cualitativas, o establecer intervalos de operación. Además, según el grado de profundidad del estudio deseado sobre un proceso, las reglas de heurística pueden evaluar propiedades básicas o de detalle, avanzadas, y pueden entregar resultados de restricción, advertencia o constituirse en simples recomendaciones [16,32,33].

Los estudiantes o ingenieros sin experiencia suelen cometer muchos errores de diseño y pese a obtener simulaciones que aparentan estar bien, ya que convergen en el simulador, podrían estar muy lejos de acercarse al comportamiento adecuado de un proceso real.

En la experiencia de la asignatura de Análisis de Procesos del programa de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, los estudiantes realizan el diseño de un proceso químico haciendo uso de simuladores de

procesos comerciales y cometen muchos errores de diseño por no tener en cuenta reglas de heurística como las mencionadas. Algunos de estos errores son los siguientes:

- Seleccionar acero al carbono como material de construcción en la mayoría de los equipos del proceso: Los simuladores de procesos no recomiendan un material para los equipos, sin embargo, si se tienen en cuenta heurísticas como las que se observan en la Tabla 11, donde se sugieren materiales de construcción para bombas de acuerdo con la naturaleza del fluido, es posible seleccionar un material adecuado. No seleccionar el material adecuado podría ocasionar procesos de oxidación o corrosión y afectar de manera irreparable los equipos del proceso.
- No tener en cuenta recomendaciones topológicas: Como se explicó anteriormente, los simuladores de procesos comerciales no cuentan con la capacidad de evaluar aspectos topológicos del diseño de un proceso. Por ejemplo, si en un proceso se requiere usar un horno, es regular instalar un intercambiador de calor antes de este, ya que se disminuiría el gasto energético en el mismo. Hacer uso indiscriminado de equipos que representan alto costo energético, podría ocasionar repercusiones negativas en la economía del proceso.
- Diseñar equipos con dimensiones exageradas: Frecuentemente, en las simulaciones se observan equipos con dimensiones exageradamente grandes o exageradamente pequeñas. Tal es el ejemplo de las torres de destilación o adsorción, donde los estudiantes no suelen tener en cuenta las intervalos o relaciones heurísticas de longitud y diámetro. No tener en cuenta dichas reglas de heurística, podría conllevar a diseñar equipos que serían imposibles de construir en la realidad.

- Diseñar equipos con propiedades no acordes con la disponibilidad comercial o técnica: Comúnmente se observan diseños de equipos con propiedades muy por encima o muy por debajo en relación con su disponibilidad comercial, o también equipos con condiciones de operación muy especiales. Por ejemplo, seleccionar una bomba rotatoria para manejar un fluido de 10000 gpm, cuando estas manejan flujos de hasta 5000 gpm o usar una bomba centrífuga para manejar un fluido con una temperatura de 1000 °C, cuando estas manejan máximo temperaturas de 850 °C [34]. Los simuladores no advierten sobre estos intervalos o valores técnicos de operación o de disponibilidad comercial e incluso permiten abusar del uso de condiciones especiales. Esto podría ocasionar graves consecuencias en el diseño del proceso, afectando no únicamente el equipo en cuestión sino lo que pueda suceder aguas arriba o aguas abajo del proceso e incluso podría generar afecciones directas o indirectas en la seguridad industrial del proceso.

Topología de procesos químicos

La topología de procesos químicos, se refiere a la secuencia de operaciones y equipos necesarios para transformar las materias primas en los productos deseados, es decir, cómo estos están localizados e interconectados entre sí y con las corrientes del proceso [11,35]. Existen reglas que concretan una topología común en el diseño de procesos, que han sido establecidas a través de la experiencia en el diseño conceptual, y que definen una configuración estructural típica de los equipos, ayudando a que el diseño de los procesos se efectúe correctamente. Los simuladores de procesos no suelen tener en cuenta dichas reglas, de forma que interconectan equipos y corrientes sin tener en cuenta si es coherente o necesario que se realice de esta manera. Un primer y sencillo ejemplo se da cuando los simuladores permiten conectar corrientes directamente a equipos con una mayor presión, lo que en la práctica ocasionaría un contraflujo;

un segundo ejemplo sería cuando permiten implementar corrientes de reflujo con un muy bajo porcentaje de recuperación, algo no viable económicamente si se llevara a la realidad.

Pese a los avances que han tenido los simuladores de procesos en los últimos años, no hay estudios recientes sobre la implementación de funcionalidades que evalúen la congruencia de los resultados de los procesos simulados, respecto a la viabilidad de llevarlos a cabo en el campo industrial. Esta investigación se originó tras la observación de todas estas falencias de los simuladores y las graves consecuencias que éstas podrían ocasionar. Por lo tanto el trabajo aquí mostrado se dirige hacia el desarrollo y la evaluación del algoritmo de cómputo que podría empezar a dar solución a la problemática planteada, mediante la implementación sistemática de reglas de heurística generales de diseño y la capacidad de evaluar la topología básica y general de la estructura de plantas procesos químicos [35].

CAPÍTULO 1. DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO DE CÓMPUTO PARA LA DETECCIÓN DE INCOHERENCIAS Y ERRORES PRESENTES EN LOS DISEÑOS DE PROCESOS QUÍMICOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de algoritmos y herramientas computacionales con aplicaciones en ingeniería química se centra esencialmente en la optimización y simulación de procesos o en aplicación de modelos que describen los fenómenos del transporte o transformación de sustancias. Esto se evidencia en la bibliografía, por ejemplo, *Puente et al.* en el año 2013 propusieron la aplicación de un algoritmo evolutivo para la optimización del modelado computacional de la pirólisis de materiales [36], *Daesung et al.* en 2018 crean un método para evaluar la seguridad inherente y mejorar la sostenibilidad en el diseño conceptual de procesos químicos [37] y *Vargas et al.* en 2014 diseñan una herramienta para calcular costos de capital de equipos de procesos químicos [38].

Actualmente, no se encuentra evidencia de la disponibilidad de un algoritmo que evalúe la coherencia del diseño conceptual o básico de un proceso, mediante el uso de reglas de heurística que verifiquen las propiedades de las corrientes y equipos, para contrastar lo que es posible mediante la simulación con lo que se puede llevar a cabo en la realidad.

Por las razones anteriores, el presente capítulo está enfocado en el desarrollo del algoritmo encargado de aplicar las reglas de heurística en el proceso y de reportar los errores encontrados tras su evaluación. Para su programación se utilizó el lenguaje de Microsoft Visual Basic, donde se tuvieron en cuenta las reglas de heurística halladas en la bibliografía para establecer diferentes estrategias de sistematización y se incluyeron aplicaciones adicionales que suman versatilidad a la herramienta. Un objetivo importante esta sección del proyecto fue encontrar la

manera de poder programar el algoritmo con la capacidad de evaluar todos los distintos tipos de reglas de heurística de una forma estándar y eficiente, para así poder incluir otras reglas de heurística de manera sencilla, sin la necesidad de hacer uso del lenguaje de programación.

1.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

1.2.1. Revisión del estado del arte. Como actividad esencial para esta investigación, se realizó una revisión bibliográfica constante, relacionada con los temas que contextualizan el problema que aborda este proyecto y los que permiten su avance, por ejemplo: reglas de heurística de procesos y equipos, métodos de detección de errores en el diseño de procesos, topología de plantas y configuración de equipos.

1.2.2. Organización y clasificación de las reglas de heurística. Una vez realizada la revisión bibliográfica de las reglas heurísticas generales para el diseño de procesos[15,19,32], éstas fueron organizadas y clasificadas en cuatro formas distintas.

- a. Se diferenciaron las reglas de heurística que evalúan propiedades de las corrientes del proceso, de las que evalúan propiedades de los equipos del proceso y de las que pueden evaluar propiedades tanto de las corrientes como de los equipos.
- b. Se clasificaron según el tipo de evaluación que realizan. Por ejemplo, si establecen intervalos de operación, si se usan para dimensionar equipos, si realizan cálculos o comparaciones, o si evalúan variables continuas o discretas.
- c. Se establecieron estrategias que permitieron la sistematización de los distintos tipos de heurística, de manera que se implementaran sin importar si son de carácter cualitativo o cuantitativo. De esta forma, propiedades no

cuantificables con números, como el material de construcción de un equipo, pueden ser evaluadas por el algoritmo en virtud de la naturaleza de las sustancias involucradas.

- d. Finalmente se estableció para cada regla de heurística, el tipo de resultado que podría representar en el caso de ser incumplida en el proceso evaluado, el cual puede constituirse como una advertencia o una restricción.

1.2.3. Diseño del algoritmo de detección de incongruencias. El algoritmo se realizó en el lenguaje de programación Microsoft Visual Basic®, basándose en que la única información de entrada para su funcionamiento es la información contenida en las tablas de diseño del proceso a evaluar, las cuales se conforman por una tabla de corrientes que incluye todas las corrientes del proceso con sus principales propiedades y una tabla de equipos donde se categorizan todos los equipos que intervienen en el proceso con sus especificaciones. Dichas tablas pueden provenir de un simulador comercial cualquiera e inclusive podrían provenir de un diseño realizado manualmente.

Además, se tuvo en cuenta que el algoritmo debía permitir la aplicación de reglas de heurística que evaluaran propiedades generales como la temperatura o la presión, como también propiedades específicas o más detalladas de las corrientes y los equipos, como por ejemplo la eficiencia de una torre. Lo anterior haría posible revisar el diseño con mayor detalle y efectuar un reporte personalizado de incongruencias del proceso que se estaría evaluando [9,27]. El desarrollo del algoritmo se realizó mediante los siguientes pasos:

- a. Se diseñaron los formatos en los que se disponen los datos de entrada para el funcionamiento del algoritmo. Estos deben ser completados por el usuario de acuerdo con los datos que éste obtenga de un simulador comercial o de su diseño manual. Los formatos son los siguientes:

- Tabla de corrientes del proceso. En esta tabla, el usuario debe tipificar todas las corrientes de su diagrama de flujo con las composiciones másicas de las sustancias de cada corriente y las propiedades de temperatura, presión y flujo. Además, el usuario debe especificar los equipos a los que entra y de los que sale cada corriente, de esta forma se podrá evaluar la topología del proceso. Una sección de esta tabla se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Prototipo de formato de tabla de corrientes.

Corriente	Unidades	1	2	3	4	5
Entra al equipo		Mixer9	Columna_3	Cooler_25C	Mixer9	Column_2
Sale del equipo		Flash_3	Column_2	Flash_3	Flash_3	
T	°C					
P	atm					
Fmas	kg/hr					
Fmol	kmol/hr					
Fvol	m3/s					
XMasica						
Sustancia 1	-					
Sustancia 2...	-					

- Tabla de equipos del proceso. El usuario debe consignar los equipos mayores para la industria de procesos químicos, estableciéndolos y organizándolos en subtipos, incluyendo las propiedades características de cada uno, como potencia, caída de presión y material de construcción, entre otros (en el anexo A se observa la lista de equipos implementados en este formato). En la tabla también deben especificarse las respectivas corrientes de entrada y de salida, así como las condiciones de operación para cada equipo. Una sección de esta tabla se muestra en la Figura 2.

Los formatos completos de las dos tablas pueden ser observados en el anexo B.

b. Se implementó un algoritmo preliminar de lectura e inspección que permite extraer los datos del proceso a partir de las tablas de corrientes y equipos. Del mismo modo, mediante una verificación comparativa entre las tablas, éste informa

si los datos ingresados son suficientes y coherentes para aplicar el algoritmo de detección de incongruencias.

Figura 2. Prototipo de formato de tabla de equipos.

BOMBAS	Unidades	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4
Tipo	-	Centrífuga	Reciprocante	Rotativa	Centrífuga
Presión	psi				
Temperatura	°C				
Flujo	gpm				
ΔP	psi				
Tipo de Driver	-				
Potencia	W				
Eficiencia	%				
Material de construcción	-				

c. Se diseñó el algoritmo de detección de errores, de acuerdo con la clasificación obtenida de las distintas reglas de heurística, y a las estrategias establecidas para su aplicación. Este puede detectar el tipo de regla, aplicarla sobre el diseño del proceso y establecer su cumplimiento.

d. Se programó un algoritmo de cómputo adicional que verifica que las reglas de heurística evaluadas en el proceso no generen un potencial conflicto entre ellas, ni estén incluidas dentro de otra regla ya ingresada. De esta manera, se pueden reportar las contradicciones en las reglas de heurística aplicadas y los errores y excesos en la delimitación de las variables de diseño del proceso. Esto proporciona información útil y le permite al usuario, según su criterio técnico, la posibilidad de tener en cuenta la regla de heurística más adecuada, dadas las condiciones y los objetivos específicos del proceso.

1.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

1.3.1. Revisión bibliográfica y clasificación de las reglas de heurística. Los autores que recopilan la mayor parte de reglas de heurísticas aplicables tanto para

equipos, como para la estructura del diagrama de flujo del proceso, se muestran en la Tabla 2, donde se describe brevemente su contenido.

Tabla 2. Bibliografía utilizada para la selección de las reglas de heurística.

AUTORES	BIBLIOGRAFÍA	CONTENIDO
WALAS, Stanley <i>et al.</i> [34]	Chemical Process Equipment, Selection and Design (2011)	Capítulos con reglas de heurística y manuales de diseño básico y detallado para los equipos más comunes en las plantas de procesos químicos.
BRANAN, Carl <i>et al.</i> [39]	Rules of thumb for chemical engineers (2012)	
TURTON, Richard <i>et al.</i> [40]	Analysis, Synthesis and Design for Chemical Processes (2017)	Apéndice con recopilación de tablas de reglas de heurística básica para distintos equipos y operaciones unitarias. No incluye equipos de manejo de sólidos.

Un ejemplo de las reglas de heurística que se encuentran en la bibliografía de Walas *et al* [34] se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Desempeño típico de diversos tipos de bombas. Ejemplo de reglas de heurística halladas en Walas *et al.*

Tipo	Capacidad (gpm)	Cabeza Max (ft)	P Max (psi)	NPSH (ft)	T Max (°F)	Eficiencia (%)
Centrífuga (horizontal)	15-5,000	492	600	6.56-19.7	851	20-80
	15-1,200	1394	600	6.56-22.0	851	20-75
	15-40,000	1099	980	6.56-24.9	401-851	30-90
Centrífuga (vertical)	20-10,000	804	600	0.98-19.7	653	20-85
	20-80,000	6004	700	0.98-19.7	500	25-90
	20-12,000	795	500	6.56-19.7	500	20-80
Axial	20-100,000	39	150	6.56	149	65-85
Turbina	1-2,000	2493	1500	6.56-8.20	248	55-85

Fuente: Tomado y modificado de Walas *et al* [34]

La Tabla 3 muestra la relación típica entre las variables de operación más importantes para los distintos tipos de bombas. La relación entre cada tipo de bomba y cada variable representa una regla de heurística, por ejemplo:

- Para las bombas centrífugas horizontales se tiene que éstas pueden encontrarse en el mercado con capacidades de flujo volumétrico desde 15 gpm hasta 40000 gpm. Esto se puede concluir observando el máximo y el mínimo valor observados en la columna “Capacidad” en la sección “Centrífugas horizontales”
- De la Tabla 3 se puede concluir también que las bombas rotatorias están disponibles con eficiencias entre el 50 y el 80%. Esto se evidencia en los valores del rango mostrado en la columna “Eficiencia” de la sección “Rotatoria” de la Tabla 3.

Por otra parte, es posible observar también la relación de algunas variables de operación respecto a otra variable diferente, de manera que la disponibilidad de los equipos con ciertas características particulares no depende únicamente del tipo de equipo como tal, sino también de otros criterios de operación. Por ejemplo:

- Se puede concluir que las bombas de tipo centrífuga vertical con una capacidad entre 20 gpm y 10.000 gpm, operan con cabeza máxima de 804 ft, una presión máxima de 600 psi, temperatura máxima de 653 °F y con un rango de eficiencia del 20 % al 85 %. De la misma forma se evidencia que las bombas de tipo centrífuga vertical con una capacidad entre 20 gpm y 80.000 gpm, operan con cabeza máxima de 6004 ft, una presión máxima de 700 psi, temperatura máxima de 500°F y con un rango de eficiencia del 25 % al 90 %.

Así se pueden establecer varias reglas de heurística que relacionan dos criterios. En este caso particular, es posible relacionar las capacidades de flujo (primer criterio) disponibles para cada tipo de bomba con cada variable de operación o propiedad (segundo criterio) presente en la Tabla 3, por ejemplo:

- Las bombas de tipo centrífuga vertical con una capacidad de flujo (primer criterio) entre 20 gpm y 10.000 gpm, están disponibles con una presión máxima (segundo criterio) de 600 psi. Esto significa que, si un ingeniero incluye en el diseño del proceso una bomba con una capacidad de 5.000 gpm operando a una presión de 700 psi, estaría por heurística, cometiendo un potencial error de diseño.

Es importante aclarar que las reglas de heurística de dos criterios fueron definidas procurando mantener constante el primer criterio para todas las heurísticas armadas para el mismo tipo de equipo, de esta forma se asegura que, al comparar las propiedades del segundo criterio con los valores del primero, no solo se evalúe la correspondencia de las propiedades del segundo criterio con relación a la del primer criterio, sino también la relación entre todas las propiedades del segundo criterio. Esto permitió reducir el número de heurísticas que pueden ser extraídas de la tabla, sin afectar la calidad de la evaluación de estas, en términos de cantidad de criterios y de relaciones de propiedades evaluados. En la Tabla 4 se muestran reglas de heurísticas de dos criterios que pueden ser armadas para las bombas centrífugas verticales que operan a distintas capacidades de flujo volumétrico.

Tabla 4 Reglas de heurística para bombas centrífugas verticales a distinta capacidad de flujo.

Flujo	Propiedades (segundo criterio)
20 – 10.000 gpm	Presión máxima: 600 psi
	Temperatura máxima: 653 °F
	Eficiencia: 20 % - 85 %.
20 – 80.000 gpm	Presión máxima: 700 psi
	Temperatura máxima: 500 °F
	Eficiencia: 25 % - 90 %.

Fuente: Tomado y modificado de *Walas et al.* [34]

En la Tabla 4 se observa que, manteniendo la capacidad de flujo constante como primer criterio, es posible formar ocho reglas de heurística, lo que se aleja de la dificultad de establecer tantas reglas de heurística como combinaciones posibles

entre las cinco propiedades que están involucradas, ya que esto equivaldría a un total de veinte reglas de heurísticas para las dos capacidades de flujo.

La Tabla 5 muestra la relación existente entre la naturaleza del fluido que pasa por una bomba con su respectivo material de construcción. Por ejemplo, se puede observar que para una bomba por la que circula benceno se debe usar acero al carbón, mientras que para una bomba por la que circula salmuera se debe usar níquel. De esta tabla, cada pareja de material de construcción recomendado para cada naturaleza de fluido en las bombas corresponde a una regla de heurística.

Tabla 5. Materiales de construcción de bombas. Ejemplo de las reglas de heurística halladas en *Branan* [39] .

Líquido	Cáscara y anillos de desgaste	Impulsor y anillos de desgaste	Eje
Amoníaco, anhidro y acuoso	Hierro fundido	Hierro fundido	Acero al carbono
Benceno	Hierro fundido	Hierro fundido	Acero de carbono
Salmuera (Cloruro de sodio)	Níquel resistente	Níquel resistente	K monel
Butadieno	Carcasa: anillos de acero al carbono: C.I.	Impulsor: anillos de acero al carbono: C.I.	Acero de carbono
Tetracloruro de carbono cáustico, 50% (Max. Temp. 200°F)	Misco C	Misco C	18-8 Acero inoxidable

Fuente: Tomado y modificado de *Branan et al.* [39]

Un ejemplo de las reglas de heurística halladas en la bibliografía de *Turton* [40] se expone a continuación:

La Ecuación 1 representa el desempeño general de cualquier bomba.

$$HP = 15850.3725(\Delta P * F_v) / (1715 (Eff))$$

Ecuación 1. Ecuación general de diseño de una bomba [40]

Donde,

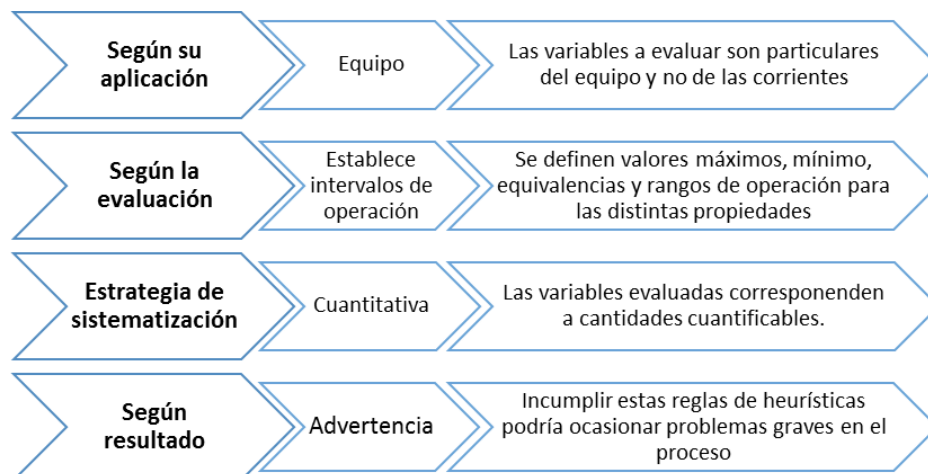
HP	Potencia en caballos de fuerza
F_v	Flujo en galones por minuto
ΔP	Presión entregada (Descarga menos succión) [kPa]
Eff	Eficiencia de la bomba [%]

Dicha ecuación puede ser tratada como una regla de heurística ya que relaciona la potencia de la bomba con sus variables más importantes (flujo, delta de presión y eficiencia). La regla de heurística evalúa que la potencia de la bomba (la establecida por el usuario), debe ser igual a la calculada mediante esta ecuación, de lo contrario debe reportarse como error heurístico.

Una vez extraídas las reglas de heurística de la bibliografía, estas fueron organizadas y clasificadas según los criterios mencionados en el diseño experimental de este capítulo. A continuación, se describe cómo se hizo esta clasificación para los ejemplos ya mencionados.

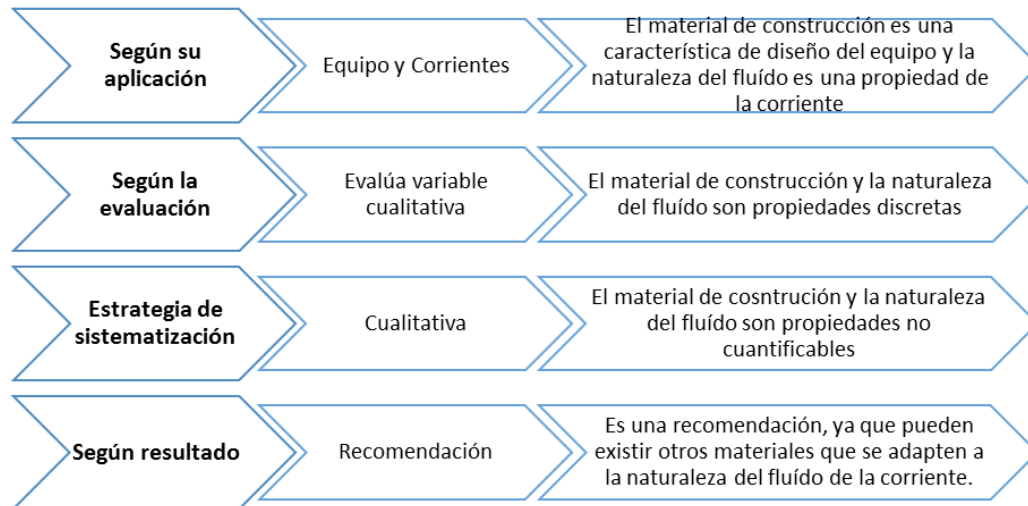
El ejemplo de la bibliografía de *Walas* [34], descrito en la Tabla 3, se clasificó como se muestra en el esquema de la Figura 3.

Figura 3. Esquema de clasificación del ejemplo de la bibliografía de *Walas* [34].



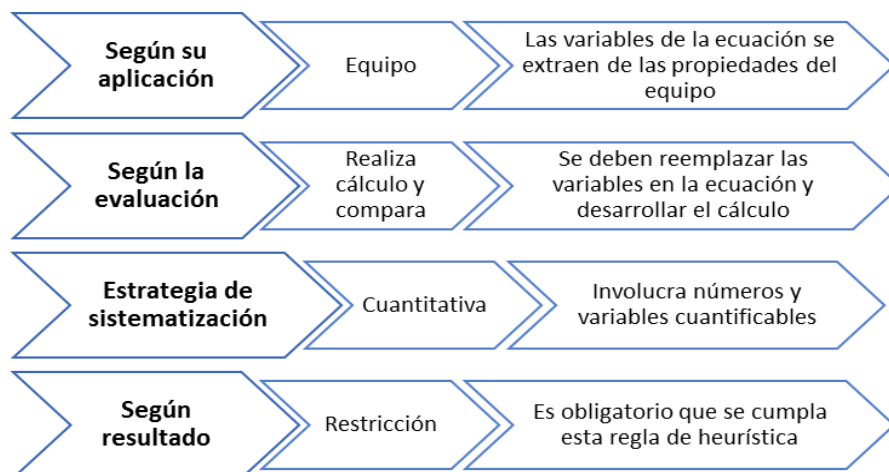
Para la clasificación del ejemplo de la bibliografía de *Branan*, descrito en la Tabla 5, se estableció el esquema de la Figura 4.

Figura 4. Esquema de clasificación del ejemplo de la bibliografía de *Branan* [39].



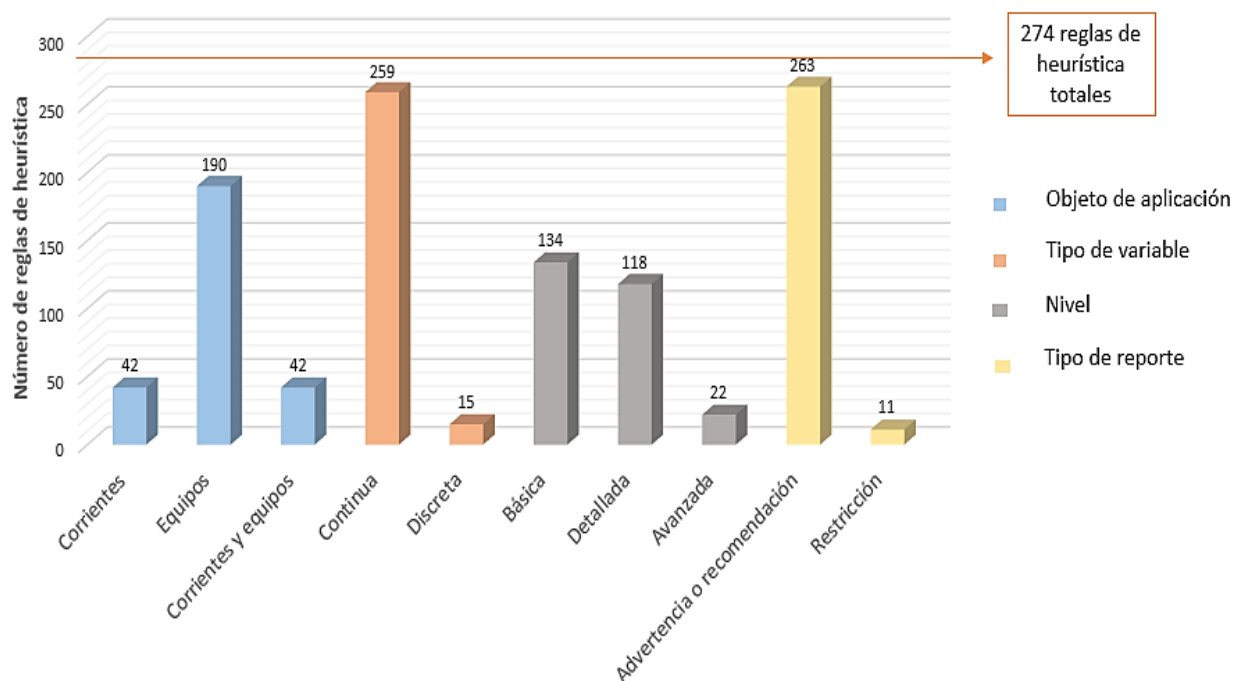
Para el ejemplo de la bibliografía de *Turton*, el cual describe el diseño general de una bomba mediante la Ecuación 1, se estableció la clasificación descrita en el esquema de la Figura 5.

Figura 5. Esquema de clasificación del ejemplo de la bibliografía de *Turton* [40].



La totalidad de las reglas de heurística extraídas de la bibliografía fueron clasificadas de acuerdo con los criterios empleados en los ejemplos anteriores. En el anexo C se incluye una tabla con el compilado de todas las reglas de heurística, donde se puede observar detalladamente la clasificación que se hizo para cada regla. La clasificación general de las 274 reglas de heurística seleccionadas se observa en la Figura 6.

Figura 6. Clasificación general de las reglas de heurística.



En la bibliografía se describen escasamente reglas de heurística aplicables a la topología del proceso debido a la poca presencia de reglas de heurística que pueden ser aplicadas a las corrientes del proceso en general. Por lo tanto, esta clasificación no fue tomada en cuenta en la gráfica anterior, pero es posible observar ejemplos de este tipo de reglas en el anexo C.

Relacionando la cantidad de reglas de heurística continuas y discretas, se observa que un 94.5% de las reglas de heurística consultadas evalúan valores continuos que establecen intervalos permisibles en las variables de operación de los equipos

presentes en un proceso. Las reglas de heurística que evalúan propiedades discretas son por ejemplo algunas recomendaciones cualitativas de materiales de construcción para equipos, recomendaciones de tipos de drivers para bombas y compresores o voltajes establecidos para el funcionamiento de equipos eléctricos.

Se escogieron pocas reglas de heurística definidas como de nivel avanzado, como por ejemplo intervalos admitidos del parámetro NPSH (*Net Positive Suction Head*) para los distintos tipos de bombas, ya que evalúan variables muy específicas de los equipos, lo que llevaría a que el usuario se viera obligado a disponer de un diseño muy detallado de cada equipo del proceso.

La mayoría de las reglas de heurística representan recomendaciones que en otras palabras son valores o características sugeridas para los equipos de acuerdo con el proceso, como por ejemplo el material de construcción de un equipo. Otra gran parte de reglas de heurística representan advertencias, es decir, previenen sobre características o propiedades del proceso que podrían ocasionar fallas en el proceso o problemas ambientales o de seguridad, por ejemplo, violar algún límite permisible de una sustancia en las corrientes de desecho. Son muy pocas las reglas de heurística que representan restricciones, las más comunes están relacionadas con aspectos teóricos de la operación adecuada de los equipos, por ejemplo, revisar que por las bombas solo pasen corrientes completamente líquidas.

En el anexo A es posible observar la diversidad de equipos sobre los que fue posible agrupar una cantidad suficiente de reglas de heurística de diseño y operación para ser implementados en el programa. En el anexo C es posible observar ejemplos detallados y clasificados de todos los tipos de heurísticas ya mencionados. Una vez seleccionadas las reglas de heurística que se implementarían en el programa y habiendo definido las estrategias de sistematización, se procedió a realizar la programación de los algoritmos.

1.3.2. Programación del algoritmo preliminar. El algoritmo preliminar tiene la función de revisar y preparar la información que suministra el usuario una vez llena o carga las tablas PFD de corrientes y de equipos del proceso que requiere revisar. Después de que el algoritmo verifica que los datos ingresados sean suficientes para hacer la detección de errores, entonces el algoritmo verifica además que estos estén ingresados correctamente, es decir, que la nomenclatura y el formato de los valores correspondan sean adecuados para el funcionamiento del algoritmo de detección de errores.

Los pasos que sigue el algoritmo preliminar para realizar la revisión y verificación de la información ingresada por el usuario se describen a continuación:

1. Captura la información existente en las tablas PFD de corrientes y de equipos.
2. Verifica que los equipos ingresados en la tabla PFD de corrientes tenga al menos una corriente de entrada o de salida.
3. Verifica que cada equipo consignado en la tabla PFD de corrientes, esté presente también en la tabla PFD de equipos.
4. Elimina los equipos no válidos, es decir, los que sólo estén presentes en una de las tablas PFD o los que presenten inconsistencias en la información suministrada, a estos equipos no se les puede efectuar la revisión de errores.
5. Almacena las propiedades o características de los equipos y de las corrientes del proceso, verificando la consistencia dimensional.
6. Realiza un balance de masa general y por componentes, a partir de la información que se encuentre consignada en la tabla PFD de corrientes, teniendo en cuenta las entradas y las salidas de cada equipo.
7. Comprueba que la casilla “Tipo” en la tabla PFD de corrientes del proceso, esté diligenciada para todos los tipos de equipo incluidos en el algoritmo.
8. Verifica que la información capturada esté acorde con la que requiere el algoritmo de detección de errores para funcionar.

Este algoritmo es de vital importancia, debido a que evita que se extiendan fallas de ejecución al algoritmo de detección de errores, de manera que, si la verificación hecha por el algoritmo preliminar no es satisfactoria, entonces no se podrá revisar si el proceso presenta errores heurísticos y solo se procederá a hacerlo hasta cuando el usuario manualmente corrija la información suministrada en los formatos de las tablas de datos de entrada.

1.3.3. Diseño y programación del algoritmo de detección de errores. La clasificación de estas reglas fue esencial para establecer las estrategias de sistematización que permitirían programar un algoritmo estandarizado que aceptara la inclusión de nuevas reglas de heurística, sin la necesidad de hacer uso de programación. Con base en la clasificación de las reglas de heurística que se realizó después de su recopilación, se concluyó que existe una gran variedad de reglas de heurística que representan distintas formas de verificar su cumplimiento en un proceso. Se definieron seis formas de evaluar reglas de heurística y se establecieron los pasos que se deben seguir para realizar cada tipo de evaluación; estos pasos fueron el punto de partida para el desarrollo del algoritmo de detección de errores, por esta razón se explican detalladamente a continuación:

a. Evaluación de reglas de heurística que comparan una propiedad con un valor o rango

Suponiendo que se requiere evaluar la regla de heurística que enuncia lo siguiente:

*“La potencia de las bombas **centrífugas** del proceso deben operar con una presión máxima de 600 psi”*

Se debe buscar la información o las características del o los equipos a los que se les desee aplicar la regla de heurística. Para efectos del ejemplo, se supone que se tienen los siguientes datos (ver Tabla 6).

Tabla 6. Datos de bombas para aplicar heurística de presión máxima.

BOMBAS	P-101	P-102
Tipo de bomba	Centrífuga	Reciprocante
Temperatura [° C]	125	190
Presión [kPa]	1600	200

Dado que la propiedad que se requiere evaluar es la presión máxima de las bombas centrífugas del proceso, entonces se tiene que para la bomba P-101 la presión es de 1600 kPa. La regla de heurística no podría aplicarse a la bomba P-102, ya que esta es una bomba de tipo reciprocante.

1. Se ajustan las unidades de la propiedad que se requiere a evaluar de acuerdo con las unidades de los valores que enuncia la regla de heurística. Para efectos del ejemplo se observa que la presión de la bomba P-101 está dada en kilo pascales (kPa), mientras que la regla de heurística establece como límite de presión 600 libras por pulgada cuadrada de fuerza (psi), por lo tanto, se deben transformar 1600 kPa a psi, esto equivale a 232.06 psi.
2. Se compara el valor de la propiedad del equipo con el que establece la regla de heurística. En el ejemplo la regla de heurística establece 600 psi como presión máxima, es decir, la presión de todas las bombas centrífugas del proceso debe ser menores a 600 psi. Dado que la presión de la bomba P-101 es igual 232.06 psi, esta bomba cumple con la regla de heurística y no se reporta ningún error.

Si en cambio la regla de heurística estableciera que las bombas centrífugas deben operar en un rango desde 300 hasta 600 psi, entonces la bomba P101 al operar con una presión de 232.06 psi, no cumple con la regla de heurística y el programa reportará el error.

b. Evaluación de reglas de heurística que comparan una propiedad con una ecuación

Suponiendo que se requiere evaluar la regla de heurística que enuncia lo siguiente:

“La potencia de las bombas del proceso debe ser igual a la calculada mediante la siguiente Ecuación 1”

1. Se debe buscar la información o las características del o los equipos a los que se les desee aplicar la regla de heurística. Para efectos del ejemplo, se supone que se tienen los datos consignados en la Tabla 7.

Es necesario extraer el valor de la propiedad, que en este caso es la potencia, y los valores de cada una de las variables que se usan para efectuar el cálculo de la potencia mediante la ecuación. Lo que indica la heurística es que el valor calculado de la potencia mediante la ecuación debe ser igual al valor de la potencia asignado por el usuario.

Tabla 7. Datos de bombas para aplicar heurística de cálculo de potencia.

BOMBAS	P-101	P-102
Tipo de bomba	Centrífuga	Reciprocante
Potencia [kW]	1500 kW	2200 kW
Flujo volumétrico [m ³ /h]	136.3	181.7
Diferencia de presión [psi]	40	60
Eficiencia [%]	75	75

2. Se ajustan las unidades de la propiedad que se requiere evaluar y las de las variables de la ecuación de acuerdo con las unidades de los valores que enuncia la regla de heurística. Los valores de la potencia y de las variables de la ecuación, ajustados con respecto a las unidades que maneja la regla de heurística del ejemplo, se enseñan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de la potencia y de las variables de la ecuación de bombas centrífuga y reciprocante.

BOMBAS	P-101	P-102
Tipo de bomba	Centrífuga	Reciprocante
Potencia [hp]	20390.432	29910.168
Flujo volumétrico [gpm]	600	800
Diferencia de presión [psi]	275.790	413.685
Eficiencia [%]	75	75

3. Se deben remplazar las variables en la ecuación para encontrar el valor de la potencia, según la regla de heurística:

P-101

$$HP = 15850.3725(275.790 * 600) / (1715 (75))$$

$$HP = 20391.25 [hp]$$

P-102

$$HP = 15850.3725(413.685 * 800) / (1715 (75))$$

$$HP = 40785.25 [hp]$$

Se compara el valor de la propiedad del equipo con el calculado mediante la ecuación establecida por la regla de heurística. En el ejemplo, para la bomba P-101 se determinó mediante la ecuación de la regla de heurística que la potencia de la bomba debe ser 20391.25 hp, este valor comparado con el valor de la potencia ingresado por el usuario (20390.43 hp) son equivalentes, de manera que se cumple con la regla de heurística. En cambio, para la bomba P-102 se determinó mediante la ecuación de la regla de heurística que la potencia de la bomba debe ser 40785.25 hp, este valor comparado con el valor de la potencia ingresado por el usuario (29910.168 hp) no son equivalentes, de manera que no se cumple la regla de heurística, y en este caso el programa detectará y reportará el error.

c. Evaluación de reglas de heurística que comparan una ecuación con un valor o rango

Suponiendo que se requiere evaluar la regla de heurística que enuncia lo siguiente:

“La relación de la longitud (L) y el diámetro (D) de los tanques del proceso, deber estar entre 1.0 y 1.5”

Se tiene entonces que:

$$1.0 \leq \frac{L}{D} \leq 1.5$$

Donde,

L = Longitud

D = Diámetro

1. Se debe buscar la información o las características de los equipos a los que se les desee aplicar la regla de heurística. Para efectos del ejemplo, se tienen los datos de la Tabla 9.

Tabla 9 Datos de tanques para aplicar heurística de relación longitud/diámetro

TANQUES	TK-101	TK-102
Tipo de tanque	Vertical	Vertical
Longitud [m]	5	4
Diámetro [m]	3.8	1.5

Se deben extraer los valores de las propiedades que intervienen en la ecuación y realizar el cambio de unidades si es necesario.

2. Se rempazan las variables en la ecuación para encontrar el valor de la relación L/D según la regla de heurística:

P-101

$$\frac{L}{D} = 1.32$$

P-102

$$\frac{L}{D} = 2.67$$

3. Se compara el valor obtenido mediante la ecuación con el valor o rango establecido por la heurística. En el ejemplo, para el tanque TK-101 se determinó que la relación L/D equivale a 1.32; se observa que este valor se encuentra dentro del rango establecido, por lo que el tanque TK-101 cumple con la regla de heurística. En cambio, para el tanque TK-102, la relación L/D equivale a 2.67; este valor supera el rango que permite la regla de heurística, por lo tanto, el tanque TK-102 no cumple con la regla de heurística y el equipo debe ser rediseñado.

d. Evaluación de reglas de heurística que comparan una propiedad con otra propiedad

Si una regla de heurística supuesta que es válida para las torres establece lo siguiente:

“La altura (h) de las torres debe ser mayor a su diámetro (D)”

1. Se debe buscar la información o las características del o los equipos a los que se les desee aplicar la regla de heurística. Para efectos del ejemplo, se tienen los datos de la Tabla 10.

Tabla 10. Datos de torres para aplicar heurística de relación longitud/diámetro.

TORRES	T-101	T-102
Tipo de torre	Empacada	Platos
Longitud [m]	3	2
Diámetro [m]	3.5	0.5

Se deben extraer los valores de ambas propiedades y hacer el cambio de unidades si es necesario

2. Se comparan las dos propiedades, en este caso la regla de heurística establece que la longitud debe ser mayor que el diámetro. Para la torre T-101 se tiene que la longitud es menor que el diámetro, por lo tanto, no cumple la regla de heurística y el equipo debe ser rediseñado. Por otra parte, la longitud de la torre T-102 es mayor que su diámetro, entonces la torre T-102 cumple con la regla de heurística.

e. Evaluación de reglas de heurística de topología de diagramas de flujo

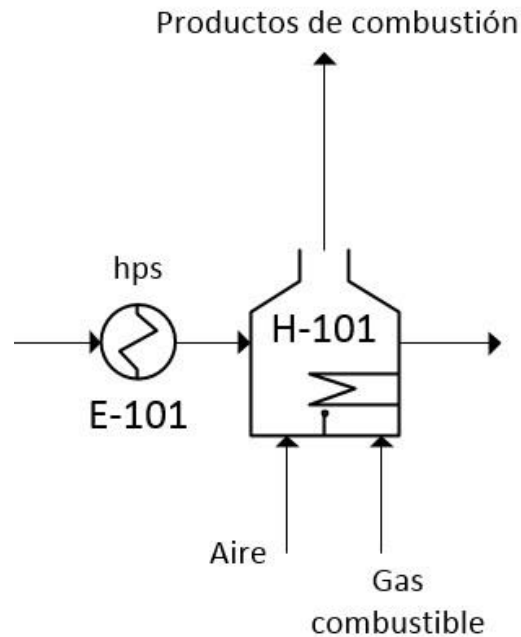
Como se explicó anteriormente, la topología de procesos químicos se refiere a la secuencia de operaciones y equipos necesarios para transformar las materias primas en los productos deseados, es decir, cómo estos están localizados e interconectados entre sí y con las corrientes del proceso [11,36]. Un ejemplo de este tipo de reglas de heurística establece lo siguiente:

“Se recomienda instalar un intercambiador de calor antes de un horno con el fin de reducir el gasto energético en el horno”

La evaluación manual de esta regla de heurística se haría de la siguiente forma:

1. Se deben ubicar los hornos del proceso. Para el ejemplo se cuenta con la sección del diagrama de flujo de un proceso mostrada en la Figura 7.

Figura 7. Sección del diagrama de flujo del proceso de producción de benceno.



Fuente: Tomado y modificado de Turton *et al.*[40]

Este proceso cuenta con la presencia del horno H-101, un horno que opera con gas natural como combustible.

2. Se revisa que el equipo que antecede al horno corresponda a un intercambiador de calor, en este caso el equipo que antecede el horno H-101 es el intercambiador E-101, entonces se cumple con la topología recomendada por la regla de heurística.

f. Evaluación de reglas de heurística que evalúan parejas de propiedades relacionadas

Existen propiedades de los equipos que están ligadas a la selección de otras propiedades, o a características particulares del proceso. Por ejemplo, el material de construcción de las bombas está ligado a la naturaleza del fluido que pasa a través de la bomba, la heurística que representa esta relación entre el material de construcción de las bombas y la naturaleza del fluido se resume en la Tabla 11.

Tabla 11. Relación entre el material de construcción de las bombas y la naturaleza del fluido.

Material	Naturaleza de la sustancia
Hierro fundido	Amoniacal (anhidro y acuoso)
	Aromático
	Tetracloruro de Carbono
	Cáustico 10% (con algo de cloruro de sodio)
	Dicloruro etílico
	Cloruro etílico
Níquel resistente	Salmuera (Cloruro Sódico)
Carcasa: Acero al carbono	Butadieno
Carcasa: Acero al carbono	Propílico
Misco C	Cáustica 50% (Max. T. 200°F)
Níquel	Cáustica 50% (alrededor de 200°F y 73%)

Fuente: Tomado y modificado de *Walas, 2011* [34]

Para evaluar esta regla de heurística se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se debe buscar la información o las características de los equipos a los que se les desee aplicar la regla de heurística. Para efectos del ejemplo, se tienen los datos de la Tabla 12.

Tabla 12. Datos de material de construcción y naturaleza de fluido para las bombas del ejemplo.

BOMBAS	P-101	P-102
Tipo de bomba	Centrífuga	Reciprocante
Naturaleza del fluido	Agua	Etileno
Material de construcción	Hierro fundido	Hierro fundido

Dado que la propiedad que se requiere evaluar es el material de construcción en relación con la naturaleza del fluido, entonces se tiene que para la bomba P-101 el material de construcción es *hierro fundido* y la naturaleza del fluido es agua, mientras que para la bomba P-102 el material de construcción es *hierro fundido* y la naturaleza del fluido es etileno.

2. Se debe revisar en la tabla que el material elegido para la construcción de la bomba sea adecuado para el fluido que manejará. En este caso, para la bomba P-101 por la cual pasa agua, el material elegido corresponde a *hierro fundido* y es adecuado, debido a que se confirma en la tabla establecida por la heurística. Para la bomba P-102 de acuerdo con la heurística y a la naturaleza del fluido que maneja (etileno) se recomienda que el material de construcción sea *acero al carbono* en vez de *hierro fundido*, por lo tanto, la bomba P-102 no cumple con la regla de heurística.

g. Evaluación de reglas de heurística de dos criterios

Existen reglas de heurística que evalúan una propiedad característica de un equipo, en relación con otra propiedad característica del mismo. Un ejemplo concreto podría ser una regla de heurística que enuncie algo como lo siguiente:

Para las bombas tipo centrífugas horizontales se sugiere que, hasta una capacidad (flujo volumétrico) de 5000 gpm, se permite una presión máxima de 600 psi y hasta una capacidad de 40000 gpm, se permite una presión de máxima 980 psi. Una capacidad superior a 40000 gpm no es recomendada.

En el ejemplo el primer criterio es la capacidad de la bomba, la cual no puede superar los 40000 gpm; el segundo criterio es la presión de operación de la bomba, la cual está condicionada por un valor máximo de presión dentro de un rango permitido de capacidad. Para evaluar esta regla de heurística se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se debe buscar la información o las características del o los equipos a los que se les desee aplicar la regla de heurística. Para efectos del ejemplo, se tienen los datos de la Tabla 13.

Tabla 13. Propiedades de flujo y presión para las bombas del ejemplo.

BOMBAS	P-101	P-102
Tipo de bomba	Centrífuga horizontal	Centrífuga horizontal
Flujo volumétrico [m ³ /h]	10300	1000
Presión [psi]	800	650

Dado que la propiedad que se requiere evaluar es la presión y el flujo volumétrico de las bombas centrífugas horizontales del proceso, entonces se tiene que para la bomba P-101 la presión es de 800 psi y el flujo es de 10300 m³/h y para la bomba P-102 la presión es de 650 psi y el flujo es de 1000 m³/h.

2. Se ajustan las unidades de las propiedades de acuerdo con la heurística.
3. Se compara el valor de la propiedad del primer criterio con el rango o los valores establecidos por la regla de heurística. En este caso, la bomba P-101 con un flujo de 45349.53 gpm supera el valor del flujo máximo permitido para las bombas centrífugas horizontales (40000 gpm), por lo tanto, no cumple con el primer criterio y no se puede evaluar el segundo criterio y entonces incumple con la regla de heurística. Por otra parte, la bomba P-102 con un flujo de 4404.87 gpm, cumple con el primer criterio de la regla de heurística, entonces se puede evaluar el segundo criterio.
4. Una vez evaluado el primer criterio se evalúa el segundo criterio para los equipos que cumplieron con el primer criterio. Se debe ubicar el valor o el rango correspondiente del segundo criterio de acuerdo con la propiedad evaluada por el primer criterio. En este caso la bomba P-102 con un flujo de 4404.87 gpm no debe superar una presión de 600 psi. La bomba P-102 al operar con una presión de 650 psi no cumple con el segundo criterio, por lo tanto, no cumple con la regla de heurística y el equipo debería ser rediseñado.

A partir de estos pasos se programó un lenguaje de comandos que en su combinación permiten ingresar de manera estándar cualquier tipo de regla de heurística, para que el algoritmo de detección de errores pueda verificar su cumplimiento en el proceso que se está evaluando.

1.3.4. Comandos programados para el ingreso y evaluación de reglas de heurística. Mediante programación en Visual Basic, se desarrollaron los siguientes comandos que cumplen una función específica para la introducción y evaluación de las reglas de heurística.

- Comando “LEER”: Este comando se encarga de buscar el valor de la propiedad que se desea evaluar, ya sea en la tabla PFD de equipos o en la tabla PFD de corrientes. También permite leer los equipos con los que está directamente conectado un equipo en específico, ya sea aguas arriba o aguas abajo.
- Comando “VALOR”: Permite asignar un valor o un rango numérico dado por la heurística, para que este pueda ser comparado según el criterio asignado por la regla.
- Comando “TEXTO”: Permite asignar un valor textual dado por la heurística, para que este pueda ser comparado según el criterio asignado por la regla.
- Comando “CALCULAR”: Permite ingresar una ecuación con variables que pueden estar contenidas en la tabla PFD de equipos, en la tabla PFD de corrientes o en ambas. Además, este comando cuenta con un compilador automático de ecuaciones que permite remplazar las variables de la ecuación ingresada, por los valores correspondientes contenidos en las tablas, si las dimensiones de las variables de la ecuación no son las mismas que las de los valores contenidos en las tablas, se encarga de realizar el cambio de unidades.

También fue necesario programar un conjunto de operadores que son los que permiten realizar la comparación de las propiedades del proceso con lo que

establece la regla de heurística. Los operadores programados son: < (menor que un valor numérico), > (mayor que un valor numérico), <= (menor o igual que un valor numérico), >= (mayor o igual que un valor numérico), = (igual a un valor numérico), entre (representa un rango entre valores numéricos), instr (línea de texto contenida en otro texto) y contenido (texto o valor numérico contenido en una tabla de datos).

Mediante la combinación de los comandos y los operadores programados, es posible ingresar cualquier regla de heurística que obedezca a una de las formas de evaluación ya mencionadas. El algoritmo descifra las instrucciones dadas por los comandos y los operadores para poder verificar que se cumplan las reglas de heurística en el proceso que se esté evaluando. A continuación, se describen algunos ejemplos de cómo fueron usados los comandos y los operadores para el ingreso de las reglas de heurística.

- Ejemplo 1

Suponiendo que se requiere evaluar la regla de heurística que enuncia lo siguiente:

“Las bombas centrífugas del proceso deben operar con una presión máxima de 600 psi”

La secuencia algorítmica de los comandos que usa el software para evaluar esta regla de heurística es la siguiente:

1. Al comando “LEER” se le da la instrucción de que debe ir a la tabla de equipos, buscar todas las bombas de tipo centrífugas y leer la propiedad “PRESIÓN”
2. Se usa el operador “<=” para acotar el valor de la presión a un límite superior, ya que la heurística indica un valor máximo permitido.

3. Al comando "VALOR" se le ordena con el operador " $\leq$ " y el valor "600 psi" que compare el valor de la presión con el valor de la presión correspondiente para cada bomba centrífuga leído por el comando "LEER". Aquí se hace un ajuste automático de unidades si es necesario.
 4. Se reportan los equipos que no cumplen con la regla de heurística
- Ejemplo 2

Retomando la heurística de potencia para bombas de *Turton* [40] se tiene:

"La potencia de las bombas del proceso debe ser igual a la calculada mediante la Ecuación 1"

La secuencia algorítmica de los comandos que usa el software para evaluar esta regla de heurística es la siguiente:

1. Al comando "LEER" se le da la instrucción de que debe ir a la tabla de equipos, buscar todas las bombas del proceso y leer la propiedad "POTENCIA"
2. Al comando "CALCULAR" se le asigna la ecuación, este comando lee los caracteres, identifica las variables, las constantes numéricas y los operadores. Busca las variables ΔP , F_v y E_{ff} para cada bomba en la tabla de equipos y ajusta las unidades de cada variable de acuerdo con las de la ecuación. Calcula el valor de la potencia mediante la ecuación.
3. Ya que la heurística enuncia que la potencia de las bombas debe ser igual a lo que se calcula mediante la ecuación, se asigna el operador "=" para hacer la comparación entre el valor de la potencia extraído mediante el comando "LEER" y el valor calculado mediante el comando "CALCULAR"
4. Si existen equipos que no cumplan con lo establecido en el punto 3, estos son reportados, ya que no cumplen con la regla de heurística.

De manera similar se usaron estos comandos y operadores para ingresar todas las reglas de heurística con las que cuenta el programa por defecto. Para asignar los comandos, operadores y demás instrucciones de cada una de las reglas de heurística se usó el formato que se muestra en el anexo D.

1.3.5. Análisis de los algoritmos adicionales. La verificación del cumplimiento de las reglas de heurística se hace esencialmente sobre las propiedades de las corrientes del proceso y las características y dimensiones de los equipos.

En el momento en el que el algoritmo de detección de errores deba evaluar el cumplimiento de una regla de heurística, las unidades de la propiedad a evaluar en los formatos de los datos de entrada deben ser iguales a las que establece la regla de heurística. Llegado el caso en el que las unidades sean distintas, el algoritmo de detector y convertidor de unidades ajusta las unidades, convirtiendo los valores establecidos por la regla de heurística a las mismas unidades de los detectados en las tablas PFD. Esto es posible siempre que las unidades establecidas para la propiedad pertenezcan al mismo grupo dimensional que las establecidas por la regla de heurística.

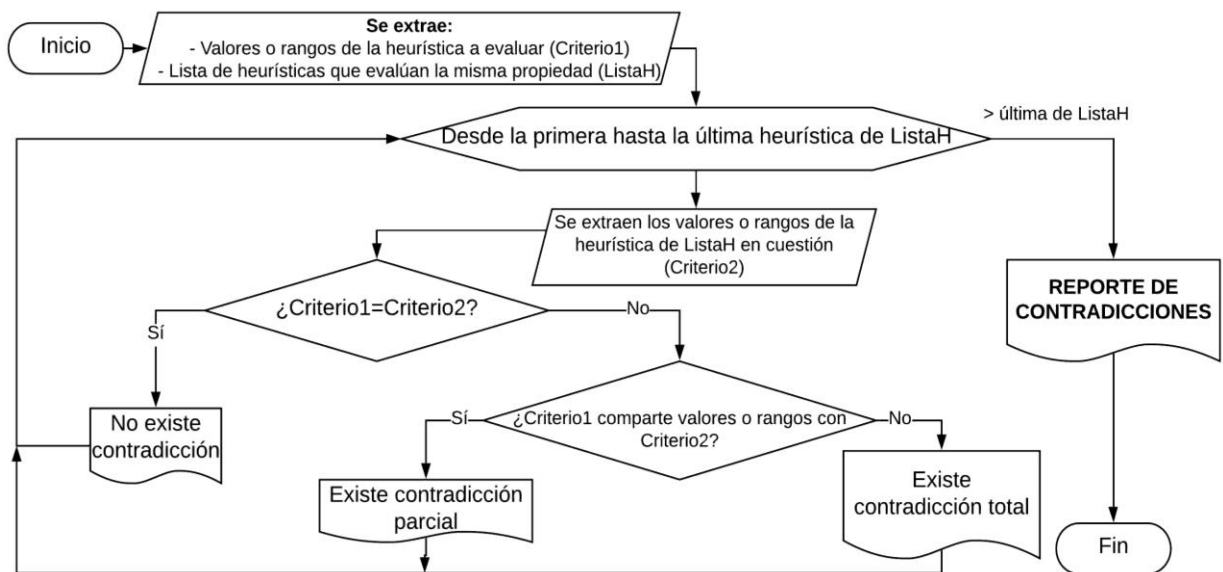
Es importante resaltar que este algoritmo está programado para que funcione automáticamente, cada vez que sea necesario verificar consistencia dimensional o hacer conversiones de unidades. Adicionalmente cuenta con un amplio banco de unidades y grupos dimensionales que van desde unidades básicas de longitud, hasta unidades compuestas de parámetros de diseño como el coeficiente de transferencia de calor.

Por otra parte, existen reglas de heurística que evalúan la misma propiedad y a su vez pueden ser aplicadas sobre el mismo equipo o corriente, tal es el ejemplo de la relación L/D (longitud/diámetro) de los tanques; en la bibliografía de *Walas et al.* la heurística establece que la relación L/D debe ser igual a 2 [34], mientras que *Turton et al.* sugieren que esta relación se encuentre en un intervalo de 1.5 a 3

[40]. Suponiendo que para un tanque la relación L/D sea igual a 2.5, este equipo estaría cumpliendo con la heurística de *Walas et al.*, pero no con la de *Turton et al.*, de manera que existe una contradicción entre las dos reglas de heurística.

Por lo anterior, se programó un algoritmo que detecta contradicciones entre reglas de heurística, con la finalidad de que dichas contradicciones puedan ser alertadas para que el usuario, según su criterio, pueda decidir cuál regla de heurística tener en cuenta. Cuando el algoritmo de detección de errores se dispone a evaluar una regla de heurística, antes de hacerlo verifica si hay alguna otra heurística activa que evalúe la misma propiedad sobre el mismo equipo o corriente, en el caso de que la haya, el algoritmo verifica si las reglas de heurística se contradicen de forma parcial, total o si no se contradicen. El diagrama de dicho algoritmo se observa en la Figura 8.

Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de contradicciones.



Este algoritmo compara entre sí los rangos o valores establecidos de las reglas de heurística involucradas, si detecta que son los mismos entonces no habría contradicciones, en otro caso si detecta que estos rangos o valores tienen cierta similitud establece una contradicción parcial o si por lo contrario no hay ninguna

similitud, este algoritmo establece una contradicción total entre las reglas de heurística.

Estos dos algoritmos complementan el algoritmo de detección de errores y se aplican automáticamente cada vez que se evalúa una a una las reglas de heurística que se desean verificar en el proceso.

1.3.6. Análisis de la capacidad del algoritmo de detección de errores. El algoritmo de detección de errores se desarrolló buscando estandarizar la forma de ingresar y evaluar las reglas de heurística que se requieran verificar en un proceso.

El algoritmo permite todos los tipos de heurística, con sus respectivas formas de evaluación ya enunciadas y por eso, hace posible detectar los errores de diseño ya mencionados y otros que se puedan evaluar mediante la verificación de reglas de heurística.

Para realizar la verificación del cumplimiento de las reglas de heurística, primero debe ser satisfactoria la evaluación realizada por el algoritmo preliminar sobre los datos consignados en las tablas PFD de corrientes y equipos del proceso. Una vez hecho esto, el algoritmo de detección de errores detecta cuales equipos han de ser evaluados y los clasifica por tipo de equipo, por ejemplo: bombas, compresores, reactores, etc. Seguidamente, selecciona el primer tipo de equipo y lee que reglas de heurística pueden ser evaluadas para el tipo de equipo seleccionado. Luego el algoritmo selecciona la primera regla de heurística, establece que propiedad va a evaluar de los equipos o las corrientes y lee los criterios establecidos por la regla de heurística.

Una vez hecho esto, el algoritmo fija que propiedades o variables son necesarias extraer de las tablas PFD de equipos y corrientes para realizar la evaluación y las almacena en una matriz para todos los equipos que pertenezcan al tipo de equipo que se esté revisando. Luego mediante los comandos descritos en la sección

1.3.4, establece que equipos no cumplen con la regla de heurística. De la misma forma va revisando todas las reglas de heurística que se puedan verificar para el tipo de equipo en cuestión y una vez las haya revisado todas continua con el siguiente tipo de equipo y realiza el mismo proceso de revisión de reglas de heurística y así hasta llegar al último tipo de equipo. El diagrama de flujo general del algoritmo de detección de errores se observa en el anexo E.

Las estrategias de sistematización de las reglas de heurística permitieron desarrollar un algoritmo capaz de evaluar una gran cantidad de reglas de heurística en poco tiempo, el cual con la integración de los algoritmos adicionales, cuenta con la capacidad de convertir unidades automáticamente siempre y cuando se obedezca la consistencia dimensional, realizar cálculos y comparaciones con las propiedades de los equipos y las corrientes, comparar los valores consignados en las tablas con los establecidos por las reglas de heurística, así como detectar contradicciones entre las reglas de heurística ingresadas con el fin de dar información útil al usuario para que este pueda decidir qué regla de heurística debe tener en cuenta o no. Este algoritmo se puede retroalimentar con nuevas reglas de heurística y permite la implementación de nuevos equipos para ser evaluados. Otra ventaja clara es que el algoritmo funciona únicamente con las tablas PFD de corrientes y de equipos del proceso.

1.4. CONCLUSIONES

Se encontró un total de 274 reglas de heurística que evalúan distintas características del diseño de un proceso, algunas establecen intervalos de operación en las variables principales de los equipos. Además, se identificaron ecuaciones de diseño que pueden ser consideradas como reglas de heurística. Fue posible clasificar las reglas de heurística seleccionadas y establecer seis distintas estrategias de evaluación para su sistematización en el algoritmo principal de detección de errores.

Programar la evaluación de las reglas de heurística en el proceso, mediante distintos comandos y operadores fue la manera más acertada, ya que a su vez posibilita retroalimentar el algoritmo con nuevas reglas de heurística. Dado que se encontraron reglas de heurística que se contradicen, fue necesario programar un algoritmo adicional que permite la detección de contradicciones entre las reglas de heurísticas que se aplican a un mismo proceso.

Finalmente, añadir un compilador de ecuaciones y un convertidor de unidades que trabajan juntamente con el algoritmo principal, permitió cumplir el primer objetivo de este trabajo y obtener un algoritmo poderoso y versátil, lo que a su vez conllevó al posterior desarrollo de una interfaz gráfica que permitiera la aplicación del algoritmo principal de una manera sencilla y amigable para el usuario.

CAPÍTULO 2. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA PARA LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE INCONGRUENCIAS.

2.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo está enfocado en el desarrollo la interfaz gráfica para la aplicación del algoritmo, con la finalidad de que la herramienta sea amigable con el usuario. Para ello, se estableció una interfaz predictiva que permite intuir fácilmente las funciones de la herramienta informática, manipular los archivos y directorios de las tablas PFD de equipos y corrientes, configurar el tipo de verificación heurística que se requiere hacer en el proceso, editar las opciones del reporte de errores que se genera y retroalimentar el algoritmo con nuevas reglas de heurística. Además, se diseñó un reporte gráfico para exponer los resultados que se pueden obtener mediante el uso de esta herramienta informática. La interfaz se realizó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel®, usando controles ActiveX y programación mediante macros de Visual Basic.

2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.2.1. Diseño y desarrollo de la interfaz del menú principal. Se programó una interfaz principal de donde se ejecuta la mayor parte del algoritmo de detección de incongruencias; dicha interfaz se dividió en tres secciones:

La primera sección se denominó “Datos del autor” que es donde el usuario consigna su nombre, ingresa el nombre del proyecto y el de la asociación a la que pertenece.

La segunda sección “Tablas PFD del proceso” es el espacio donde el usuario puede cargar desde una fuente externa las tablas PFD de corrientes y equipos del proceso, esenciales para que el programa pueda verificar el cumplimiento de las reglas de heurística; en esta sección el usuario también cuenta con la opción de

crear nuevas tablas PFD, en caso tal que no cuente con las tablas en el formato requerido por el programa.

La tercera sección es un espacio donde el usuario puede seleccionar las reglas de heurística que desea revisar y también configurar las opciones del reporte de errores que se genera tras evaluar el diseño del proceso. Al final de esta interfaz aparece el botón que ejecuta la evaluación del diseño del proceso y permite que el algoritmo de detección de errores verifique el cumplimiento de las reglas de heurística seleccionadas.

2.2.2. Diseño y desarrollo de la interfaz del menú de opciones adicionales. Se diseñó un menú de opciones adicionales titulado “Otras opciones”, en este menú el usuario visualiza una interfaz con las siguientes opciones:

- **Agregar heurísticas:** Con esta opción el usuario puede acceder a un formulario que permite ingresar nuevas reglas de heurística mediante la selección de un conjunto de opciones que lo llevarán a definir con detalle el tipo de regla de heurística que desea añadir, la propiedad que desea evaluar, los equipos a los que se les puede aplicar la regla de heurística y los criterios de evaluación impuestos por la misma. El usuario puede ingresar también un título o descripción corta de la heurística que desea añadir.
- **Agregar Equipos:** Accediendo a esta opción el usuario puede crear un nuevo equipo y añadirlo al formato de la tabla PFD de equipos que el programa carga por defecto, así como también puede cargar las propiedades características del equipo con sus respectivas unidades.
- **Agregar Propiedades:** Con esta opción el usuario accede a un formulario que le permite agregar nuevas propiedades a un equipo ya existente en el formato de la tabla PFD de equipos. Cuenta con la opción de asignar las

unidades a la nueva propiedad ingresada y de asignar una sigla representativa para dicha propiedad.

- Acerca de: En esta opción el usuario puede observar la información de los autores de esta herramienta informática y la versión de la herramienta con la cual cuenta.

2.2.3. Diseño y desarrollo del reporte gráfico de incongruencias. Se programó la generación automática de un reporte, en el que se consignan de manera ordenada las incongruencias detectadas por el algoritmo según los datos de entrada, las heurísticas aplicadas y la configuración ingresada por el usuario, dejando reportadas las recomendaciones y advertencias detectadas en cada equipo o en el proceso general. Adicionalmente, se programó la generación automática de tablas y gráficas que permiten visualizar los resultados encontrados por la herramienta informática, de una forma más agradable y didáctica. Así, el usuario puede analizar la información del reporte y sacar sus propias conclusiones sobre el diseño del proceso que esté evaluando.

2.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.3.1. Interfaz del menú principal. En cuanto se abre el programa, se observa la ventana de inicio de la Figura 9.

Los componentes de esta ventana se describen a continuación:

1. Logotipo de la Escuela de Ingeniería Química y de la Universidad Industrial de Santander, instituciones relacionadas con el desarrollo de este proyecto.
2. Nombre de la herramienta y de los autores responsables del desarrollo de esta herramienta informática. Como se puede observar, se decidió nombrar a esta herramienta informática AUDIPRO, este nombre corresponde a una contracción de la expresión “Auditoría de procesos”.
3. Botón de acceso al menú principal de la herramienta.

4. Botón del acceso al menú de opciones adicionales.

Figura 9. Ventana de inicio de la interfaz de la herramienta informática.



Accediendo al menú principal del programa, se observa una interfaz dividida en tres secciones, en la Figura 10 se describe su contenido.

La interfaz del menú principal cuenta con las siguientes secciones y componentes:

1. Nombre y versión de la herramienta informática.
2. Botón de acceso a la ventana de inicio.
3. Espacio para ingresar el nombre del proceso a evaluar, el nombre del responsable de la evaluación y el nombre de la entidad para la que se realiza el reporte.
4. Botón por el que se accede a una interfaz de tipo formulario para cargar las tablas PFD de corrientes y de equipos o para crear unas nuevas tablas PFD de corrientes y de equipos. Los detalles del funcionamiento de esta interfaz se describen en el manual del usuario que se encuentra en el anexo F.

Figura 10. Interfaz del menú principal del AUDIPRO.

The screenshot shows the main menu of the AUDIPRO v 1.0 application. The interface is divided into several sections, each with a specific function. Numbered callouts (1-9) highlight key elements: 1 points to the application title, 2 to the home icon, 3 to the author data table, 4 to the file selection button for PFD tables, 5 to the PFD table data, 6 to the heuristic selection button, 7 to the report file selection button, 8 to the report data table, and 9 to the process evaluation section.

AUDIPRO v 1.0

Datos del autor

Nombre del proyecto:	Acetona
Nombre del responsable	Everth Vargas
Asociación:	UIS

Tablas PFD del proceso

Archivo excel fuente:	Ejemplo1 (2).xlsx
Hoja excel de las corrientes:	PFD_Corrientes_AudiPro
Hoja excel de los equipos:	PFD_Equipos_AudiPro

Selección de heurísticas y configuración del reporte

De click para activar o desactivar las heurísticas disponibles

Selección de heurísticas

Nombre del reporte:	Reporte 1.xlsx
Ubicación para guardar el reporte:	Users\Usuario\Documents\Reporte 1.x

Evaluación del proceso

AUDITAR PROCESO

5. Espacio donde el usuario establece donde se encuentran las tablas PFD de corrientes y de equipos, dentro del archivo externo definido en el ítem anterior.
6. Botón para acceder a una interfaz donde se podrán habilitar las reglas de heurística que se desean evaluar en el proceso. En dicha interfaz es posible observar la información detallada de cada una de las reglas de heurística que están cargadas por defecto en el programa. Un ejemplo de cómo se

visualiza esta interfaz y de cómo se usa, se observa en el manual del usuario que se encuentra en el anexo F.

7. Botón para seleccionar el nombre y la ubicación del archivo del reporte que se genera tras la evaluación del proceso. Mediante este botón también se accede a un formulario mediante el cual se configura el reporte que se desea generar. Un ejemplo detallado se observa en el manual del anexo F.
8. Espacio donde se resume la información del archivo donde se generará el reporte.
9. Botón que ejecuta el algoritmo de detección de incongruencias y por ende la verificación del cumplimiento de las reglas de heurística en el proceso que se está evaluando. Una vez terminada la evaluación el reporte se genera automáticamente en el archivo definido en el ítem anterior.

Esta interfaz cuenta con un diseño simple e intuitivo, de manera que el usuario puede predecir fácilmente las funciones de cada botón y de cada sección de la interfaz, así como se utilizó una gama de colores neutra para su visualización, buscando siempre sencillez, simplicidad y rapidez en la ejecución de la evaluación del proceso.

2.3.2. Interfaz del menú de opciones adicionales. Desde la ventana de inicio es posible acceder al menú de opciones adicionales mediante el botón “Otras opciones”.

El menú de opciones adicionales se observa en la interfaz que se ilustra en la Figura 11.

1. Botón de acceso a la ventana de inicio.
2. Mediante este botón se accede a una interfaz de tipo formulario donde el usuario puede ingresar nuevas reglas de heurística mediante la selección de un conjunto de opciones que lo llevarán a definir con detalle el tipo de regla de heurística que desea añadir, la propiedad que desea evaluar, los

equipos a los que se les puede aplicar la regla de heurística y los criterios de evaluación impuestos por la misma. Un ejemplo de cómo se visualiza esta interfaz y de cómo se usa, se observa en el manual del usuario que se encuentra en el anexo F.

Figura 11. Menú de funciones adicionales de AUDIPRO.



3. Mediante este botón se accede a una interfaz tipo formulario para agregar equipos adicionales a los ya incluidos por defecto en la herramienta. Un ejemplo de cómo se visualiza esta interfaz y de cómo se usa, se observa en el manual del usuario que se encuentra en el anexo F.
4. Botón de acceso a la interfaz de tipo formulario que se usa para agregar propiedades adicionales a los equipos ya existente en la tabla PFD de equipos de la herramienta. Un ejemplo de cómo se usa esta opción se observa en el anexo F.

5. Botón que accede a una ventana donde se muestra la información acerca de los autores y el desarrollo de este programa.
6. Casillas que describen la función de cada una de las opciones del menú de opciones adicionales.

Al igual que la interfaz del menú principal, se mantuvo un diseño simple e intuitivo para que el usuario pueda acceder fácilmente a las funciones de este menú. Se usó la misma gama de colores, buscando una estética acorde al resto del formato visual del programa.

2.3.3. Reporte gráfico. Con la finalidad de ofrecer al usuario un reporte con una mejor visualización, se programó la generación automática de un conjunto de tablas, gráficas y esquemas que organizan la información encontrada por el algoritmo tras la evaluación del proceso. El reporte que verá el usuario al final se divide en secciones que presentan la información de manera ordenada.

a. Reporte de generalidades

En la primera hoja del reporte se puede visualizar la tabla que se describe en el ejemplo de la Figura 12. Las secciones y componentes del reporte de generalidades se describen a continuación:

1. En esta sección se resume el nombre del proceso a evaluar, el nombre del responsable de la evaluación, el nombre de la entidad y la fecha de realización del reporte.
2. En esta sección se encuentra información sobre las inconsistencias encontradas en las corrientes del proceso, como las corrientes cuya suma de composiciones másicas no es igual a 1, corrientes repetidas en la tabla PFD de corrientes y las corrientes que no se encuentran conectadas a ningún equipo. Adicionalmente se distinguen las corrientes que sirven de

alimento (corrientes que entran) al proceso y las corrientes que son productos o residuos (corrientes que salen) del proceso.

Figura 12. Ejemplo de reporte de generalidades del AUDIPRO.

REPORTE DE GENERALIDADES 1	
Nombre del proyecto:	Acetona
Nombre del responsable:	Everth Vargas
Asociación:	UIS
Fecha de generación del reporte:	19/02/19 22:44
GENERALIDADES E INCONSISTENCIAS EN LOS DATOS DE ENTRADA 2	
CORRIENTES	
Corrientes cuya suma de composiciones no es igual a	-Ninguno-
Corrientes repetidas en la tabla	-Ninguno-
Corrientes no conectadas a equipos	-Ninguno-
Corrientes que se alimentan al proceso	28, 34, 35, 36, 38, 40
Corrientes que son productos o residuos del proceso	27, 29, 37, 39, 41
EQUIPOS 3	
Equipos sin corrientes de entrada	TK-101
Equipos sin corrientes de salida	TK-302, TK-303/TK-304, TK-301
Equipos no definidos en la tabla de equipos	R-201A/B, VLV-301, MIX-301, VLV-302, TK-303/TK-304, E-305, VLV-303
Equipos no definidos en la tabla de corrientes	TK-303, TK-304
Equipos con tipo de equipo no válido	H-201, TK-101, TK-301, TK-302, TK-303, TK-304
GENERALIDADES SOBRE LAS HEURÍSTICAS INGRESADAS 4	
RESUMEN DE HEURÍSTICAS EVALUADAS	
Equipos válidos	P-101A/B, MIX-101, V-301, V-302, P-301A/B, P-201A/B, C-301A/B
Filtros aplicados	TODOSEQUIPOS, Advertencia, Recomendacion
Cantidad de heurísticas disponibles	91
Cantidad de heurísticas evaluadas	38

- Sección que resume las inconsistencias encontradas en los equipos del proceso, como los equipos sin corrientes de entrada y sin corrientes de

salida, equipos no definidos en la tabla de equipos, equipos no definidos en la tabla de corrientes y equipos con tipo de equipo no válido.

4. En esta sección se resumen los equipos válidos para aplicarles la verificación del cumplimiento de reglas de heurística, los filtros aplicados para la evaluación, la cantidad de heurísticas disponibles y las evaluadas. Los equipos que se detectan como no válidos son aquellos a los que no se les evalúa ninguna regla de heurística, por lo tanto, son candidatos por agregar en el menú “Otras opciones” donde hay un formulario para agregar nuevas heurísticas y así ser tenidos en cuenta en un futuro.

El usuario con esta primera sección del reporte ya puede hacer observaciones útiles sobre el proceso que está evaluando, por ejemplo, las corrientes que no están conectadas a ningún equipo son corrientes que sobran en el diagrama de flujo del proceso, así mismo los equipos no contenidos en la tabla de corrientes indican que hay inconsistencias entre las tablas PFD de equipos y de corrientes. Esto indica que el programa no solamente verifica el cumplimiento de reglas de heurística, sino que a su vez hace un análisis general sobre la consistencia del diagrama de flujo del proceso que se está evaluando y la información consignada en sus respectivas tablas PFD.

En la actividad académica es común que los estudiantes ingresen mal la información en las tablas PFD del proceso, ya sea cometiendo errores de digitación o porque no extraen los datos del simulador de manera adecuada. Este error provoca que la topología del proceso se vea afectada por la presencia de equipos que al parecer no presentan corrientes de entrada ni de salida. Además, verificar que la información consignada en estas tablas sea consistente, es una labor compleja para el profesor y es acá donde se resalta la utilidad de este programa como una herramienta para revisar diseños de procesos realizados en la actividad académica.

b. Errores en los balances de masa

En esta sección del reporte el usuario podrá observar un reporte de los errores de balance de masa detectados por el algoritmo, de acuerdo con los flujos másicos consignados en la tabla PFD de corrientes. Este reporte de balances de masa se genera con el fin de que el usuario pueda verificar que los datos de los flujos y las composiciones de las corrientes de una simulación que haya convergido, no se hayan alterado. El formato de presentación de estos errores se muestra en la Figura 13. Las secciones del reporte de balance de masa se describen a continuación:

1. En esta sección se observan los equipos que contienen errores en sus balances de masa, ya sea en el balance general o por componentes. El cierre del balance se presenta con un error porcentual que debe equivaler a 0.00% cuando el balance se cumple, mientras que los errores de balance se resaltan en rojo. Se resume la cantidad de errores y el error porcentual promedio de los balances para cada equipo que presenta errores.
2. Resumen del número de equipos que presentan errores de balances y la cantidad de balances errados respecto a la cantidad de balances realizados por la herramienta.
3. En esta sección el programa reporta los equipos que no tienen corrientes de entrada o de salida, estos equipos no se tienen en cuenta en el balance puesto que estrictamente no lo cumplirían al no tener corrientes de entrada o de salida, por eso se le recomienda al usuario que verifique que estos equipos sean tanques de almacenamiento. El programa tiene la facultad de verificar si hay reactores en los que no ocurra reacción y lo reporta en esta sección. Esto lo hace verificando el balance por componentes, ya que, pese a que el reactor debe cumplir con el balance de masa general, no debe cumplir con al menos dos balances por componentes, los cuales

corresponden a los balances de la sustancia que reacciona y a la sustancia que se produce.

Figura 13. Ejemplo de reportes de errores en los balances en masa del AUDIPRO.

REPORTE DE ERRORES EN LOS BALANCES DE MASA			
		R-201A/B	H-201
Balance general		0.0%	0.0%
Balance por componentes	Agua	0.0%	100.0%
	Acetona	2065.4%	0.0%
	Hidrogeno	100.0%	0.0%
	2 - propanol	89.3%	0.0%
	BiPhenyl	0.0%	0.0%
	DiPH-Ether	0.0%	0.0%
	Metano	0.0%	100.0%
	Oxigeno	0.0%	83.3%
	Nitrogeno	0.0%	0.0%
	Monoxido de carbono	0.0%	0.0%
	Dioxido de carbono	0.0%	100.0%
	Propano	0.0%	0.0%
# Balances errados		3	4
Error Promedio		751.6%	95.8%

Equipos con errores	2/27 equipos presentan errores de balance
Balances con errores	7/351 balances no se cumplen

Errores en equipos especiales	
Equipos sin corrientes de entrada (verificar si son tanques)	Ninguno
Equipos sin corrientes de salida (verificar si son tanques)	TK-303/TK-304
Reactores en los que no ocurren reacciones	Ninguno

Mediante esta sección del reporte, el usuario puede realizar varias conclusiones sobre el proceso que está evaluando, por ejemplo, puede determinar qué reactores están operando, qué equipos no cumplen con los balances de masa, o si hay fallas en el comportamiento de un componente en específico en todo el proceso. Los simuladores de procesos comerciales pese a que detectan los

errores en el balance de masa, no advierten si hay reactores que no estén operando, esta es una característica con la que sí cuenta AUDIPRO.

Por otra parte, en el caso que no se cuente con la simulación del proceso y se tenga la información detallada de las corrientes, este reporte del balance de masa es bastante útil, ya que le evitaría al usuario evaluar el balance de masa equipo a equipo y en cambio obtendría un reporte sobre el cumplimiento de dicho balance en cada equipo del proceso en tan solo segundos.

c. Reporte de inconsistencias de los datos ingresados

En esta sección del reporte, el usuario puede identificar los errores referentes a los datos ingresados en las tablas PFD de corrientes y de equipos, que impiden realizar la verificación del cumplimiento de las reglas de heurística. Estas inconsistencias se presentan en una tabla como la que se muestra en el ejemplo de la Figura 14.

En la sección de inconsistencias dimensionales en las propiedades ingresadas, se reflejan los equipos que presentan fallas dimensionales en el momento de verificar el cumplimiento de alguna regla de heurística. Por otra parte, en la sección de inconsistencias por propiedades faltantes, se presentan los equipos que no tienen la información de propiedades suficiente para verificar el cumplimiento de alguna regla de heurística. Esta tabla se diseñó para que se clasificaran estas inconsistencias de acuerdo con el tipo y subtipo de equipo, cada tipo de equipo se presenta sombreado con un color definido por defecto, al igual que los subtipos se presentan con un tono más tenue del color correspondiente a cada tipo de equipo.

Figura 14. Reporte de inconsistencias en los datos ingresados del AUDIPRO.

REPORTE DE INCONSISTENCIAS EN LOS DATOS INGRESADOS		
INCONSISTENCIAS DIMENSIONALES EN LAS PROPIEDADES INGRESADAS		
Tipo de equipo	Subtipo de equipo	Inconsistencias de unidades
No se presentan inconsistencias de unidades		
INCONSISTENCIAS POR PROPIEDADES FALTANTES		
Tipo de equipo	Subtipo de equipo	Propiedades faltantes
BOMBAS	CENTRIFUGA	P-101A/B: No se ha definido la propiedad Cabeza para este equipo (heurística no evaluada)
		P-101A/B: No se ha definido la propiedad Material de construccion&Naturaleza del fluido para este equipo (heurística no evaluada)
		P-101A/B: No se ha definido la propiedad NPSH para este equipo (heurística no evaluada)
		P-301A/B: No se ha definido la propiedad Cabeza para este equipo (heurística no evaluada)
		P-301A/B: No se ha definido la propiedad Material de construccion&Naturaleza del fluido para este equipo (heurística no evaluada)
		P-301A/B: No se ha definido la propiedad NPSH para este equipo (heurística no evaluada)
	RECIPROCANTE	P-201A/B: No se ha definido la propiedad Cabeza para este equipo (heurística no evaluada)
		P-201A/B: No se ha definido la propiedad Material de construccion&Naturaleza del fluido para este equipo (heurística no evaluada)
		P-201A/B: No se ha definido la propiedad NPSH para este equipo (heurística no evaluada)
COMPRESORES	RECIPROCANTE	C-301A/B: No se ha definido la propiedad Material de construccion&Naturaleza del fluido para este equipo (heurística no evaluada)
RECIPIENTES DE PROCESOS	VERTICAL	MIX-101: No se ha definido la propiedad Altura para este equipo (heurística no evaluada)
		V-301: No se ha definido la propiedad Altura para este equipo (heurística no evaluada)
		V-302: No se ha definido la propiedad Altura para este equipo (heurística no evaluada)

d. Reporte general de inconsistencias heurísticas

En esta sección del reporte, el usuario puede observar las inconsistencias encontradas tras la evaluación de las reglas de heurística. Estos errores se presentan en una tabla como la que se muestra en el ejemplo de la Figura 15.

Figura 15. Ejemplo de Reporte de inconsistencias heurísticas halladas en AUDIPRO.

REPORTE INCONSISTENCIAS HEURISTICAS HALLADAS EN LOS EQUIPOS		
HEURISTICAS INCUMPLIDAS QUE GENERAN RESTRICCIONES		
Tipo de equipo	Subtipo de equipo	Restricciones
No se incumplieron heurísticas que generen restricciones		
HEURISTICAS INCUMPLIDAS QUE GENERAN ADVERTENCIAS		
Tipo de equipo	Subtipo de equipo	Advertencias
BOMBAS	CENTRIFUGA	P-100: El flujo volumétrico (0.057 m ³ /h) esta fuera del rango permitido [0.227 a 4542.494 m ³ /h]
	RECIPROCANTE	P-101: La eficiencia (0.75 %) está por fuera del rango permitido [20 a 85 %]
COMPRESORES	CENTRIFUGO	K-100: El flujo volumétrico (0.1002 m ³ /h) esta fuera del rango permitido [849.505 a 322812.051 m ³ /h]
		K-100: La potencia (24.91 kW) esta fuera del rango permitido [50 a 8000 kW]
		K-100: La presión (1520 kPa) está fuera del rango permitido [2068.428 a 3447.380 kPa]
		K-101: El flujo volumétrico (0.6984 m ³ /h) esta fuera del rango permitido [849.505 a 322812.051 m ³ /h]
		K-101: La potencia (6.275 kW) esta fuera del rango permitido [50 a 8000 kW]
		K-101: La presión (152 kPa) está fuera del rango permitido [2068.428 a 3447.38 kPa]

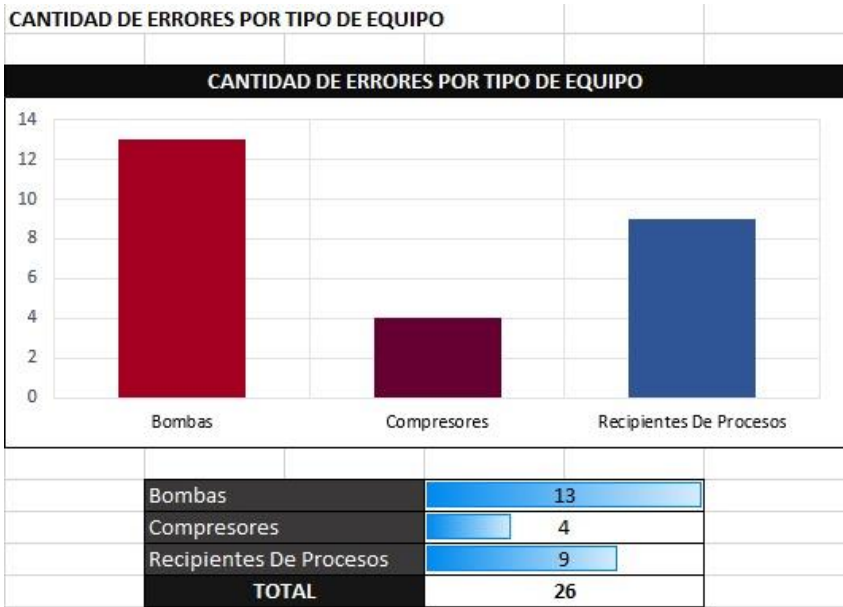
Como se observa en la Figura 15, en la sección de inconsistencias heurísticas, se consignan los errores de heurística hallados tras la evaluación del proceso. Los errores se clasifican según el tipo de equipo y el subtipo de equipo, enunciando todos los errores heurísticos detectados en cada equipo dentro de la clasificación. Estos errores se muestran clasificados en advertencias y recomendaciones. De la misma forma que en la sección de inconsistencias en los datos ingresados, cada tipo de equipo se presenta sombreado con un color definido por defecto, al igual que los subtipos se presentan con un tono más tenue del color correspondiente a cada tipo de equipo.

e. Cantidad de inconsistencias por tipo y subtipo de equipo

Con el fin de que el usuario observe qué equipos presentan la mayor cantidad de errores o inconsistencias tras usar la herramienta en su proceso, se programó la generación automática de unas gráficas de barras que muestran la cantidad de

errores encontrados por tipo y subtipo de equipo. Un ejemplo de la cantidad errores encontrados por tipo de equipo se observa en la Figura 16.

Figura 16. Ejemplo de reporte de cantidad de errores por tipo de equipo.



De esta gráfica se puede concluir que, de los 26 errores heurísticos encontrados en el proceso evaluado, 13 corresponden a bombas, 4 a compresores y 9 a recipientes de procesos. De forma similar, se genera una gráfica para cada tipo de equipo, la cual clasifica la cantidad de errores de acuerdo con el subtipo de equipo. La Figura 17 representa un ejemplo de esta clasificación para los errores encontrados en las bombas del proceso.

Figura 17. Ejemplo de cantidad de errores por subtipo de equipo.



De la gráfica del ejemplo se puede concluir que la mayor parte de errores heurísticos de las bombas se presentan en las de tipo centrífuga.

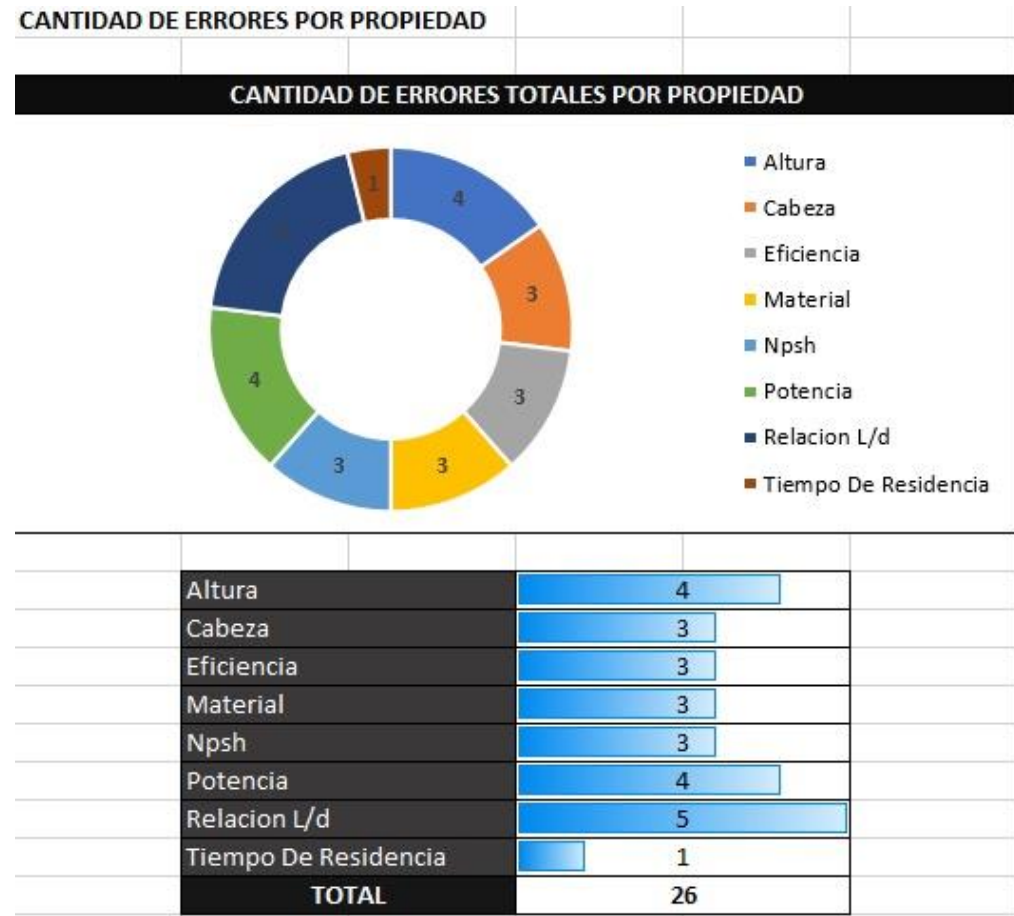
Como se observa en las gráficas, el color de las barras para cada tipo de equipo corresponde al mismo color asignado para cada tipo en las tablas de las anteriores secciones del reporte. La información mostrada en esta sección del reporte le ayuda al ingeniero, diseñador o estudiante a concentrar sus esfuerzos de ajuste de diseño los estos equipos que más presentan errores, en lugar de estar revisando la totalidad de un diseño de planta completa.

f. Cantidad de errores por propiedad

Se programó la generación automática de unas gráficas de anillo que muestran la cantidad de errores encontrados por propiedad para todos los equipos del proceso

en general y para cada tipo de equipo. Un ejemplo de cantidad de errores totales por propiedad se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Ejemplo de reporte de cantidad de errores por propiedad de equipo.



Con la gráfica anterior, el usuario puede observar la cantidad de errores que presenta cada propiedad, esta información puede ser útil para concluir en qué característica puede estar fallando el diseño del proceso, por ejemplo, si hay muchos errores de temperatura el ingeniero o encargado del diseño debería revisar la parte energética del proceso. De igual forma, se presenta una clasificación de los errores encontrados según la propiedad, en una gráfica de anillo para cada tipo de equipo que presenta errores. Un ejemplo de la cantidad de errores por propiedad para las bombas se presenta en la Figura 19.

Figura 19. Ejemplo de reporte de cantidad de errores para bombas.



En esta sección del reporte se presenta una gráfica como la anterior para cada tipo de equipo que presenta errores heurísticos o de inconsistencias en los datos de entradas en el diseño del proceso, así el usuario puede observar las propiedades en las que más se están cometiendo errores por cada tipo de equipo.

g. Reporte de contradicciones en las heurísticas evaluadas

Al evaluar varias reglas de heurística en un equipo, puede haber reglas de heurística que evalúen la misma propiedad. Existe la posibilidad de que en el caso que haya reglas de heurística que evalúen la misma propiedad, unas se cumplan y otras no, representando contradicciones en las reglas de heurística evaluadas.

Este programa no tiene la capacidad de decidir cuál es la regla de heurística correcta, no obstante, cuenta con la capacidad de advertir al usuario qué reglas de heurística se están contradiciendo para que éste pueda estudiarlas y concluir qué regla de heurística se debería tener en cuenta. Dichas contradicciones se presentan en una tabla como la que se muestra en el ejemplo de la Figura 20.

Figura 20. Ejemplo del reporte de contradicciones en las heurísticas evaluadas.

REPORT DE CONTRADICCIONES EN LAS HEURISTICAS EVALUADAS		
CONTRADICCIONES ABSOLUTAS EN LAS HEURISTICAS EVALUADAS		
Tipo de equipo	Subtipo de equipo	Contradicción
BOMBAS	CENTRIFUGA	Las heurísticas 75 y 32 se contradicen al ser aplicadas sobre la propiedad POTENCIA
RECIPIENTES DE PROCESOS	VERTICAL	Las heurísticas 63 y 62 se contradicen al ser aplicadas sobre la propiedad RELACION L/D
		Las heurísticas 71 y 62 se contradicen al ser aplicadas sobre la propiedad RELACION L/D
CONTRADICCIONES PARCIALES EN LAS HEURISTICAS EVALUADAS		
Tipo de equipo	Subtipo de equipo	Contradicción
No se presentan contradicciones parciales		

En esta tabla se clasifican las contradicciones en absolutas y parciales. Las contradicciones absolutas son aquellas reglas de heurística que no tienen ningún valor similar en el criterio de evaluación, mientras que las contradicciones parciales son aquellas que presentan valores similares en los criterios de evaluación. Por ejemplo, si se tiene una regla de heurística que enuncia que la temperatura máxima permitida en las bombas centrífugas equivale a 500°C y hay otra regla de heurística que enuncia que la temperatura de las bombas centrífugas debe estar entre 0 y 400°C, estas reglas de heurística se contradicen parcialmente, ya que el intervalo de temperatura indicado por la segunda heurística está permitido dentro del límite de máxima temperatura establecido por la primera heurística. En otro caso, si se tiene una regla de heurística que establece que la relación longitud/diámetro de los tanques de almacenamiento

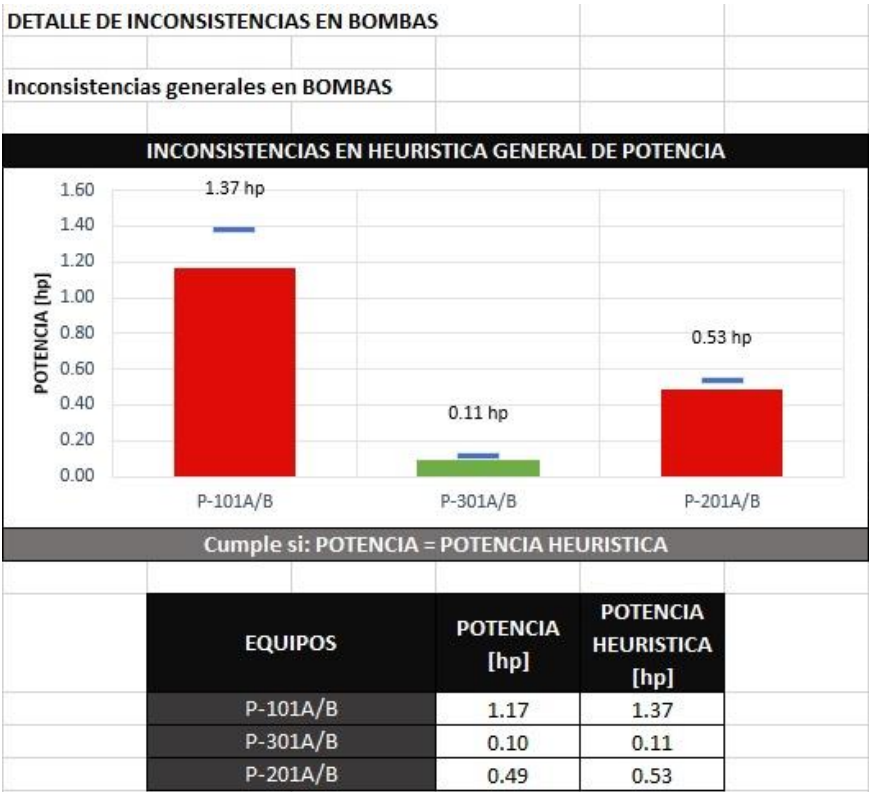
debe ser igual a 1, y otra regla que enuncia que la relación longitud/diámetro de los recipientes de procesos debe estar entre 2 y 4, estas reglas de heurística se contradicen de forma absoluta, ya que el valor permitido por la primera regla de heurística, no está contenido en el intervalo que establece la segunda regla de heurística para la relación longitud/diámetro de los tanques de almacenamiento. El detalle de las heurísticas que se contradicen se puede observar en la interfaz de selección de heurísticas del programa.

h. Reporte detallado de las heurísticas aplicadas por tipo de equipo

Se programó la generación de un reporte detallado de las heurísticas aplicadas para cada tipo de equipo. Dicho reporte se compone de gráficas que explican con detalle tanto las reglas de heurística generales, como las específicas para cada subtipo de equipo. En la Figura 21, se presentan una serie de gráficas a manera de ejemplo de cómo se visualiza esta sección del reporte.

Esta heurística enuncia que la potencia de las bombas del proceso debe ser igual a la calculada mediante la ecuación que establece la regla de heurística. En la gráfica, las barras representan el valor de la potencia de las bombas consignado en las tablas PFD de equipos, mientras que las líneas azules representan el valor calculado mediante la regla de heurística. Las bombas P-101A/B y P-201A/B poseen una potencia que difiere de la calculada por la heurística, por ende, no cumplen con la regla de heurística y las barras se tiñen de rojo, mientras que la bomba P-301A/B tiene una potencia similar a la calculada mediante la heurística, por ende, esta bomba cumple con la regla y la barra se tiñe de color verde.

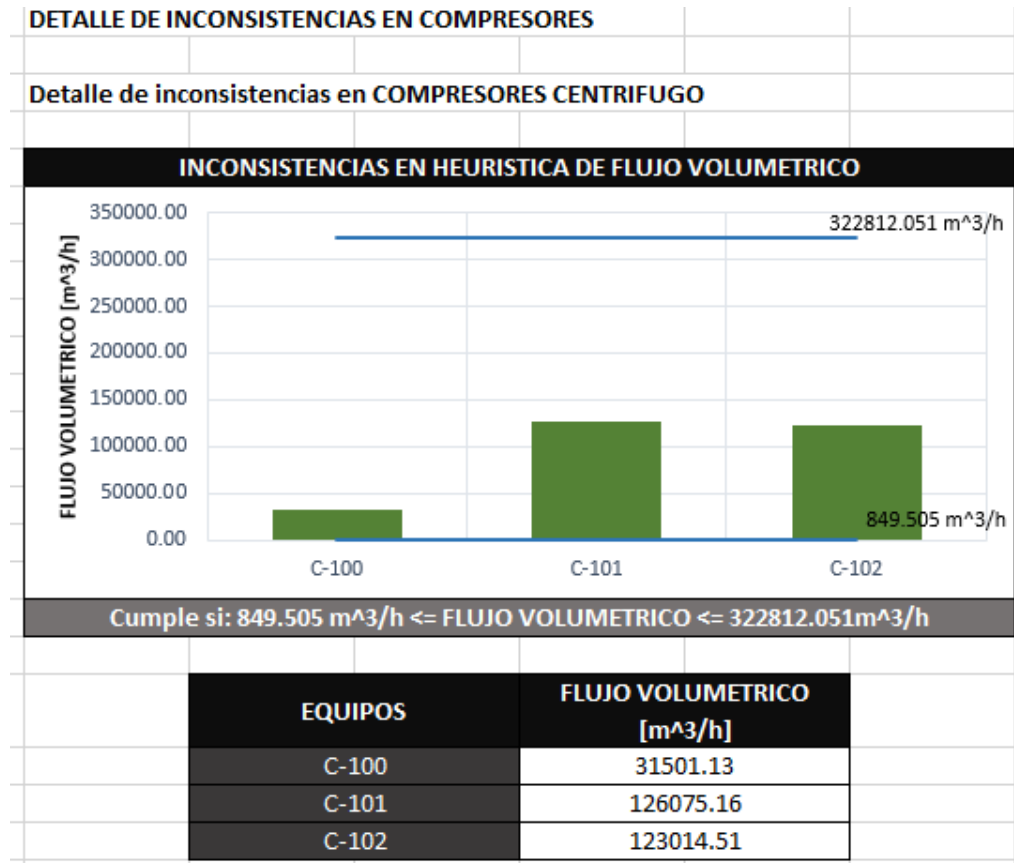
Figura 21. Ejemplo 1 de detalle de inconsistencias en bombas.



Este un ejemplo claro de cómo se detalla una regla de heurística que involucra cálculos de propiedades mediante ecuaciones. Es importante aclarar que, para cada regla de heurística, el usuario puede controlar el porcentaje de diferencia o la tolerancia a partir del cual se define cuando es inconsistente y cuando no.

La Figura 22 representa el detalle de una regla de heurística que se aplica únicamente a los compresores de tipo centrífugo. Dicha heurística establece un intervalo de flujo en el cual está permitido que operen los compresores de tipo centrífugo. En la gráfica, las líneas azules representan el límite inferior y superior del intervalo de flujo volumétrico y las barras indican el valor del flujo volumétrico consignado en la tabla PFD de equipos, para los compresores de tipo centrífugo.

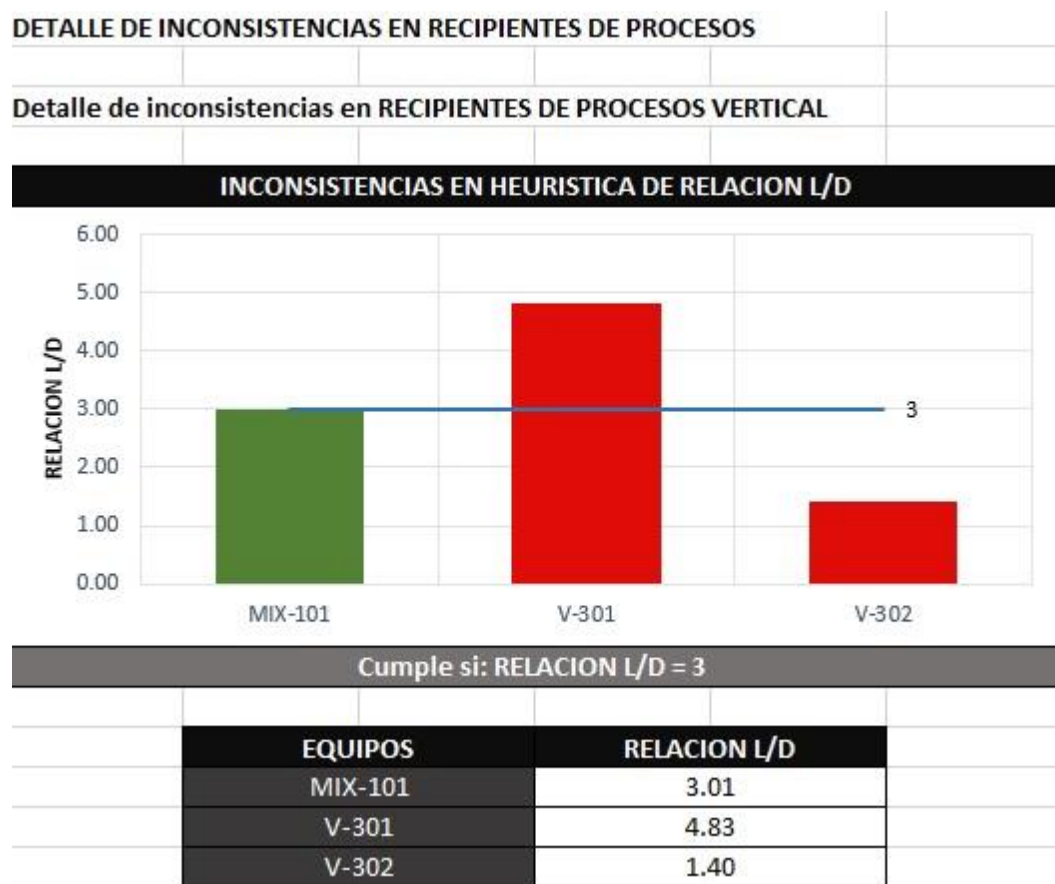
Figura 22. Ejemplo 2 de detalle de inconsistencias en bombas.



Dado que el flujo de los compresores C-100, C-101 y C-102 se encuentra dentro del intervalo establecido por la heurística, ambas bombas cumplen con la regla y las barras se tiñen de verde, en caso contrario éstas se teñirían de color rojo.

La Figura 23 muestra el detalle de una regla de heurística que se aplica a los recipientes de tipo vertical, la regla establece que la relación longitud/diámetro (L/D) debe ser igual a 3.

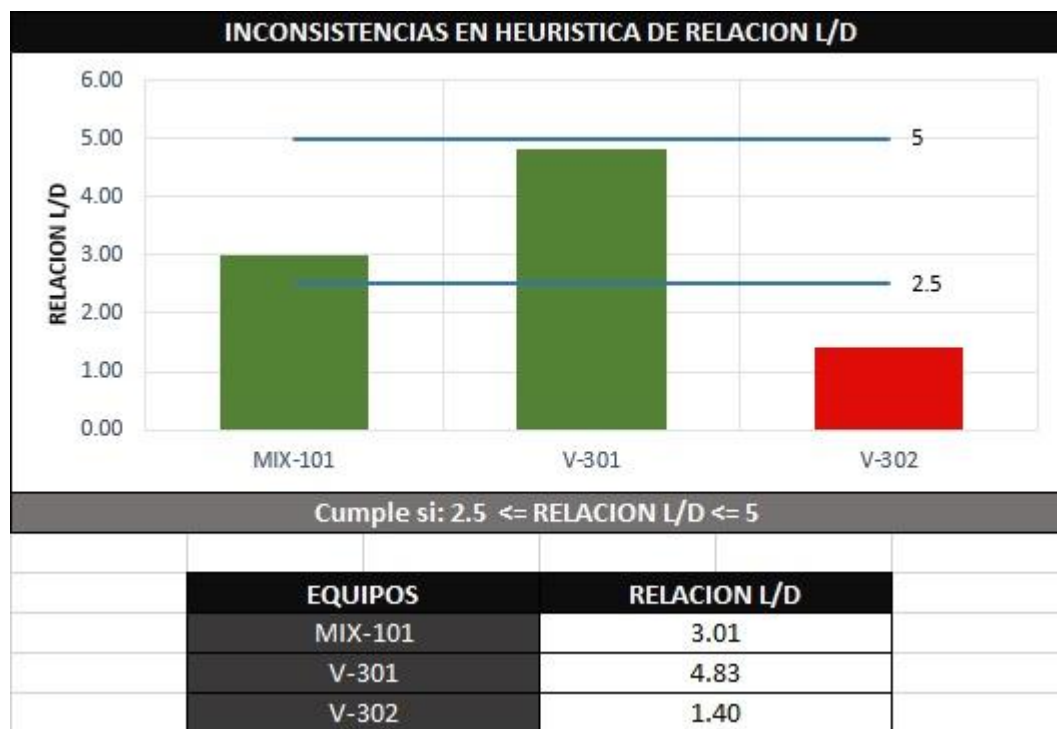
Figura 23. Ejemplo1 de detalle de inconsistencias en recipientes de procesos.



En la gráfica el valor establecido por la regla de heurística está representado por una línea azul y las barras indican el valor calculado de la relación L/D para un recipiente de tipo vertical. Como se observa en la gráfica, el recipiente MIX-101 cumple con la regla de heurística al tener una relación L/D igual 3.01, valor muy cerca al establecido por la heurística, razón por la cual su barra se presenta de color verde. Por otra parte, los recipientes V-301 y V-302 presentan una relación L/D que difieren del valor establecido por la heurística, por lo tanto, no cumplen con la regla y sus barras automáticamente se tiñen de rojo.

En la Figura 24 se detalla otra regla de heurística aplicada sobre los recipientes de tipo vertical y que evalúa nuevamente la relación L/D, sin embargo, esta vez la regla establece un intervalo permitido para relación L/D.

Figura 24. Ejemplo 2 de detalle de inconsistencias en recipientes.



Los límites inferior y superior del intervalo están representados por las líneas azules en la gráfica, mientras que las barras indican el valor calcula de la relación L/D para cada recipiente de procesos de tipo vertical, presente en el proceso evaluado. Los recipientes MIX-101 y V301 poseen una relación L/D que está dentro del intervalo establecido por la heurística, por lo tanto, cumplen con la regla y sus barras son verdes. Sin embargo, el recipiente V-302 presenta una relación L/D por debajo del límite inferior del intervalo de la heurística, por ende, no cumple con la regla de heurística y su barra se visualiza de color rojo en la gráfica.

De la misma forma que se mostraron estos ejemplos del reporte del detalle de inconsistencias por equipo, el programa cuenta con la capacidad de relacionar los distintos tipos de evaluación de las reglas de heurística y plasmar los resultados de su aplicación en el proceso, mediante gráficas que permiten al usuario analizar de una manera más directa el estado de su diseño con respecto a la realidad. No obstante, no fue posible programar un reporte gráfico para todos los tipos de

heurísticas evaluadas; para reglas de heurística que evalúan propiedades no cuantificables como el material de construcción y la naturaleza del fluido, no se programó una manera gráfica de visualizar el detalle de su evaluación. Otro ejemplo claro de las limitaciones de este reporte gráfico son las reglas de heurística que evalúan más de un criterio, ya que, pese a que se ideó una manera de visualizar el detalle de estas reglas de heurística en gráficas, la programación de la generación automática de las mismas es muy compleja.

2.4. CONCLUSIONES

Diseñar una interfaz gráfica para integrar el algoritmo facilita la comunicación entre el usuario y todas las funciones programadas en el algoritmo de este programa. El diseño simple y conciso de las interfaces de la ventana de inicio, el menú principal y el menú de opciones adicionales, otorga al usuario la capacidad de predecir la función de cada uno de los elementos de la interfaz, para así poder manejar el programa de manera fluida.

Cambiar el reporte textual por la generación automática de un reporte con gráficas y tablas fue la decisión más acertada en cuanto a la presentación de los resultados tras el uso de esta herramienta informática. Esto permitió obtener un reporte que no sólo enlista los errores encontrados por el algoritmo en el proceso evaluado, sino que le permite al usuario realizar un análisis concluyente sobre el diseño del proceso. Este reporte gráfico permite analizar, por ejemplo, qué propiedades están presentando recurrentemente fallas o en qué equipos se están cometiendo errores en mayor medida. No obstante, la estrategia de evaluación de algunas reglas de heurística, como las que evalúan variables discretas o las que verifican el cumplimiento de más de un criterio, impidió que se pudiera programar la generación de una gráfica que ilustrara el detalle de la evaluación de estos tipos de reglas de heurística, sin embargo, se prevé que para una versión futura del programa se pueda implementar un reporte gráfico para las mismas.

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

3.1. INTRODUCCIÓN

Al desarrollar una herramienta informática o *software*, un aspecto muy importante es que ésta no presente fallos, ya que podría tener consecuencias negativas en la experiencia del usuario, la fiabilidad de los resultados y el desempeño de la herramienta en general. Por esta razón, resulta de suma importancia evaluar el desempeño de las herramientas informáticas y exponer su calidad antes de distribuirlas. Cuanto más complejo es el algoritmo o la herramienta informática y cuanta más responsabilidad exista en la labor que desempeñará, mayor importancia debe darse al proceso de evaluación [41].

Existen varios criterios a la hora de evaluar una herramienta informática, los más importantes y comunes son: rapidez, funcionabilidad, eficiencia, fiabilidad de los resultados y usabilidad.

Este capítulo está enfocado en la evaluación de la herramienta informática desarrollada en este proyecto. Se realizó una evaluación interna en la que se seleccionaron casos de estudio de diseños de procesos químicos, para verificar el funcionamiento de la herramienta, detectar fallas y efectuar las respectivas correcciones para obtener una versión mejorada. También se realizó una evaluación externa que involucró la participación de estudiantes. Esto permitió probar la herramienta masivamente y obtener opiniones puntuales y generales de parte del usuario y concluir sobre la necesidad que pretende suplir esta herramienta.

3.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.2.1. Evaluación interna. Para iniciar con la etapa de evaluación interna se buscaron en la literatura 6 casos de estudio de procesos químicos que contaran con una variedad de equipos considerable y que reportaran la tabla de todas las corrientes del proceso y las especificaciones principales para cada equipo. Con el fin de constatar que incluso en la literatura se evidencia la presencia de diseños de procesos errados, se escogieron 3 de estos casos de fuentes bibliográficas. En la Tabla 14 se muestran los casos de estudio seleccionados de la literatura para realizar la evaluación interna.

Tabla 14. Casos de estudio de procesos químicos tomado de la literatura.

Caso	Especificación
1	Producción de etanol por hidratación de etileno (HDE) [42]
2	Producción de benceno por hidrodealquilación de tolueno (HDA) [40]
3	Producción de surfactantes aniónicos [43]

También se tomaron casos de estudio a partir de los trabajos de clase realizados por los estudiantes de la asignatura Análisis de Procesos, del programa de Ingeniería Química de la UIS. En la Tabla 15 se muestran los casos de estudios seleccionados de la actividad académica de los estudiantes.

Tabla 15. Casos de estudio de la asignatura de Análisis de Procesos del programa de Ingeniería Química de la UIS.

Caso	Especificación
1	Producción de hidrógeno por reformado catalítico de gas (RCG)
2	Producción de hidrógeno por reformado catalítico de gas (RCG)
3	Producción de acetona por oxidación directa del propileno (ODP)

Estos seis casos de estudio se usaron para evaluar el desempeño del algoritmo y determinar qué modificaciones y correcciones deben realizarse. El diseño del proceso de cada caso de estudio fue simulado en el programa comercial Aspen

Hysys[®], haciendo converger la simulación e induciendo a su vez incoherencias topológicas en la estructura del diagrama de flujo del proceso y errores básicos de diseño y dimensionamiento de equipos que normalmente no reportan los simuladores de procesos. Esto con el fin de utilizar la herramienta sobre los casos de estudio y verificar que el algoritmo de cómputo detecte las incongruencias dadas de acuerdo con los errores inducidos y a los paquetes de reglas de heurística implementados de manera predeterminada en la herramienta informática. Las tablas PFD, el diagrama de cada proceso y el reporte generado por el software AUDIPRO se evidencian en el anexo G.

3.2.2. Evaluación externa. Una vez fue satisfactoria la evaluación interna del algoritmo y se realizaron las correcciones pertinentes, éste fue puesto a disposición de profesionales en el área y de estudiantes de la asignatura Análisis de Procesos del programa de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, para que utilizaran la herramienta en el diseño de los procesos que realizan en su actividad académica [20,28]. Para esto, se realizó una sección en donde se les explicó a los estudiantes el objetivo del desarrollo de la herramienta y los detalles de su funcionamiento.

Los estudiantes tuvieron la oportunidad de probar la herramienta con el diseño del proceso que manejan como proyecto de clase, con el fin de que puntualizaran sobre las ventajas que ofrece el programa, detectaran fallas en el funcionamiento e hicieran recomendaciones. En una encuesta aplicada, estos reportaron las opiniones sobre el diseño, la amigabilidad, velocidad, exactitud y aceptación del programa, las cuales se tuvieron en cuenta para ejecutar los arreglos finales. La encuesta que se aplicó se puede observar en el anexo H.

3.2.3. Correcciones y mejoras. Una vez realizada la evaluación externa, se analizaron los resultados de la encuesta y se realizaron las modificaciones, correcciones y arreglos finales pertinentes. Esta versión de la herramienta se dejará a disposición de los docentes de las asignaturas relacionadas con el diseño

y simulación de procesos del programa de Ingeniería Química de la UIS, quienes se encargarán de la divulgación y sociabilización del uso de esta herramienta.

3.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.3.1. Análisis de la evaluación interna. La información de los tres casos de estudio seleccionados de la literatura se organizó en los formatos de los datos de entrada para que fueran compatibles con el algoritmo y proceder a realizar la evaluación de cada uno de los diseños de proceso con la herramienta informática. Un resumen de los errores encontrados en los seis casos de estudio de la evaluación interna se puede observar en la Tabla 16.

Tras la evaluación se resaltaron las principales falencias del programa que se clasificaron en tres categorías: errores en la entrada y lectura de datos, errores de ejecución, errores en la presentación del reporte y limitaciones del programa.

a. Errores en la entrada y lectura de datos

En esta categoría se enlistaron todas las fallas relacionadas con la información que se consigna en los formatos de las tablas PFD de equipos y corrientes y las dificultades del programa a la hora de leer y traducir estos datos al lenguaje con el cual funciona el algoritmo.

Tabla 16. Resumen de los errores encontrados en los casos de estudio de la evaluación interna.

Casos de la literatura						
Proceso	N° de errores de datos	N° Balances aplicados	N° de errores de balance	N° Heurísticas evaluadas	N° Errores heurísticos	Tiempo de cómputo
Producción de etanol por hidratación de etileno (HDE) [42]	17	462	22	26	3	2 min y 20 s
Producción de benceno por hidrodealquilación de tolueno (HDA) [40]	3	180	11	21	2	1 min y 8 s
Producción de surfactantes aniónicos [43]	11	625	35	16	7	2 min y 32 s
Casos de estudiantes						
Proceso	N° de errores de datos	N° Balances aplicados	N° de errores de balance	N° Heurísticas evaluadas	N° Errores heurísticos	Tiempo de cómputo
Producción de hidrógeno por reformado catalítico de gas (RCG)	8	468	54	21	7	3 min y 41 s
Producción de hidrógeno por reformado catalítico de gas 2 (RCG)	59	472	0	20	15	2 min y 15 s
Producción de acetona por oxidación directa del propileno (ODP)	7	312	30	16	3	2 min y 10 s

El tiempo de computo se calculó en un computador con 2 Gb de memoria RAM y un procesador Intel de doble núcleo de 2.693 MHz.

Los errores encontrados que se clasificaron en esta categoría se enlistan a continuación:

- Dificultades al definir las unidades de las propiedades en las tablas PFD de equipos y corrientes.
- Dado que el programa se diseñó para interpretar propiedades textuales en letra mayúscula, hubo errores al leer las propiedades textuales consignadas en letra minúscula.
- Ambigüedad en la interpretación de los caracteres punto (.) y coma (,).
- Errores al leer valores con espacios en blanco sobrantes en los datos consignados en las tablas.
- Error al leer propiedades faltantes necesarias para evaluar una regla de heurística.
- Fallas al cargar los archivos que contienen las tablas PFD del proceso que se pretende evaluar.

b. Errores en la ejecución del algoritmo

Las inconsistencias que se definieron como errores de ejecución son aquellas relacionadas con la aplicación del algoritmo sobre los procesos que se evaluaron, es decir, errores en la evaluación de los balances, en la verificación de las reglas de heurísticas y la detección de contradicciones. Los errores que se clasificaron en esta categoría se enlistan a continuación:

- Inconsistencias al calcular el porcentaje de error en los balances de masa del proceso.
- El programa presentó dificultades al evaluar la misma regla de heurística sobre distintos equipos. La lectura de las propiedades de manera individual por equipo dificultaba y hacía lenta la verificación del cumplimiento de las reglas de heurística.

- Confusión en la selección y restauración de los factores de conversión de las unidades, donde se aplicaban factores de conversión no compatibles con las unidades de los valores que se estaban ajustando.
- Fallas en la interpretación de los elementos de las ecuaciones de las reglas de heurística que realizan cálculos, ya que no se clasificaban correctamente los caracteres de la ecuación.
- Fallas en el momento de evaluar las propiedades en la verificación del segundo criterio de las reglas de heurística de múltiples criterios. No se actualizaban los valores de la propiedad del segundo criterio para cada equipo.

c. Errores en la presentación del reporte

Al generar los reportes de los casos de estudio, se observaron algunas fallas en la presentación de los resultados encontrados por el algoritmo. La mayoría de los fallos correspondieron a la manera como se visualiza y organiza la información en las tablas y gráficas del reporte y el formato de los datos numéricos. Dichas inconsistencias se presentan a continuación:

- Cantidad variable de cifras decimales en los valores numéricos consignados en las tablas y gráficas del reporte
- Reporte de errores de reglas de heurísticas y propiedades no evaluadas
- Errores en el orden de la presentación del reporte de generalidades
- Superposición en las etiquetas de los datos en las gráficas

d. Limitaciones del programa

La evaluación de los casos de estudio permitió definir no solo los alcances del programa, sino también sus limitaciones; estas últimas se enuncian a continuación:

- En el formato de la tabla PFD de equipos no están implementados por defecto los equipos relacionados con el manejo de sólidos
- Se han de definir la mayor parte de las propiedades en la tabla de equipos, para poder realizar una revisión más completa de las reglas de heurística
- No hay gráficas que ilustren la aplicación de reglas de heurística de más de un criterio
- Los errores heurísticos que están relacionados con la estructura topológica del proceso únicamente se presentan de manera textual, es decir, no hay gráficas en el reporte, donde se puedan observar mejor estos errores.
- Los errores que corresponden a la evaluación del material de construcción de equipos, dado que sólo se presentan de manera textual, es decir, no hay gráficas en el reporte, donde se puedan observar mejor estos errores.

e. Arreglos y mejoras realizadas tras la evaluación interna

Una vez se identificaron los errores detectados en la evaluación de los casos de estudio se hicieron las correcciones y mejoras pertinentes. Las correcciones y mejoras aplicadas permitieron obtener una nueva versión de la herramienta, lista para ser sometida a la evaluación externa. Estas acciones correctivas se pueden observar en el anexo J de este documento.

3.3.2. Análisis de la evaluación externa. En la primera sesión de la evaluación externa la herramienta fue utilizada por 41 estudiantes de la asignatura Análisis de Procesos, la cual pertenece al noveno nivel del programa de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, durante el primer semestre de 2018. Para esto, los estudiantes usaron las tablas PFD del diseño del proceso de su proyecto de clase con el fin de verificar el funcionamiento de la herramienta y opinar sobre las características y funciones de esta.

Reporte de errores y fallas de ejecución en la primera sesión

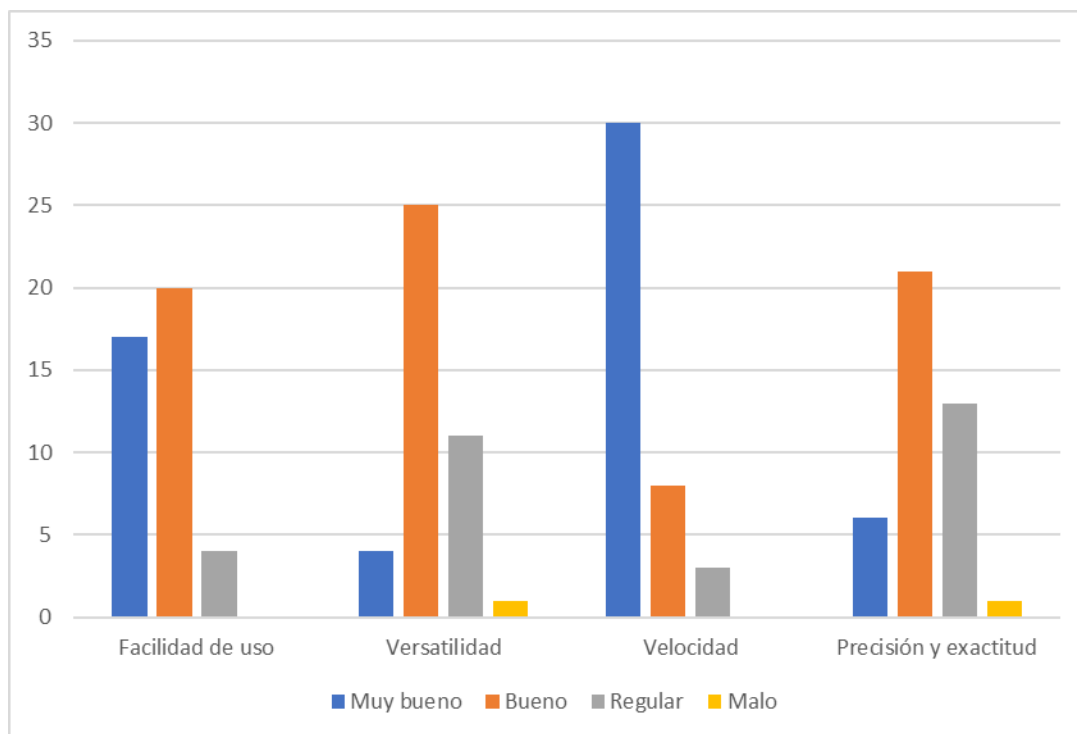
Los errores encontrados por los estudiantes respecto al desempeño del AUDIPRO en la primera sesión, se consignan a continuación:

- Inconsistencias con el escalado de las gráficas del reporte, si los valores son muy pequeños respecto a los límites impuestos por las reglas de heurística, entonces no es posible observar la barra que representa el valor de la propiedad en la gráfica.
- El programa presenta errores al cargar tablas PFD que hayan sido diligenciadas con vínculos a otras hojas o libros de Excel.
- En el reporte detallado para cada tipo de equipo, se cruzaba información correspondiente a otros tipos, por ejemplo, información de los errores de las bombas aparecían en la sección de compresores e intercambiadores de calor.
- Dificultad al escoger las unidades de las propiedades en las tablas PFD de equipos.
- Se evidencia el bloqueo de la herramienta AUDIPRO al hacer cambios de ventanas en el equipo.

Resultados de la encuesta y sugerencias de la primera sesión

Tras evaluarse mediante la encuesta la segunda versión del AUDIPRO, se observaron resultados favorables (ver anexo I). El 100% de los estudiantes encuestados reconoce la necesidad de que exista una herramienta que revise los diseños de procesos confrontándolos con el cumplimiento de reglas de heurística. En general el programa presentó fortalezas en términos de velocidad, versatilidad, precisión y facilidad de uso, esto se evidencia en la Figura 25 donde se observa el desempeño del AUDIPRO en los términos mencionados, de acuerdo con los resultados de la encuesta. Sin embargo, los estudiantes también resaltaron varias limitaciones del programa y establecieron sugerencias para su mejoramiento.

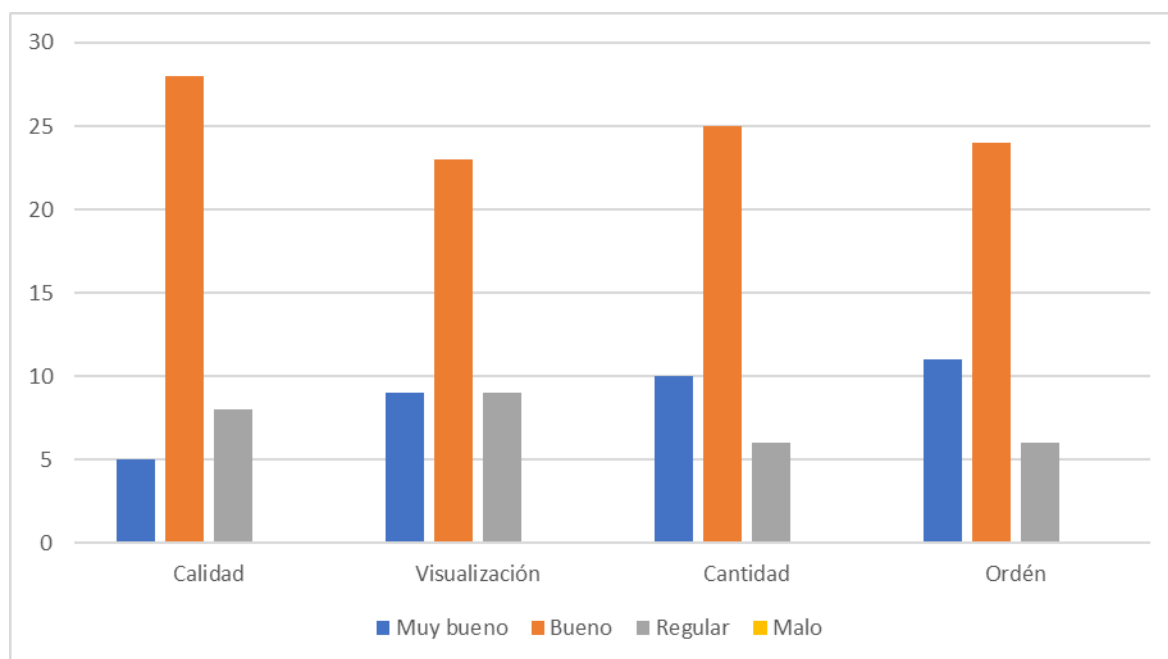
Figura 25. Resultados de la encuesta sobre el desempeño del AUDIPRO en la primera sesión.



Los estudiantes consideran adecuados el menú principal de la herramienta y los formatos de las tablas PFD de equipos y de corrientes, resaltando el fácil diligenciamiento de dichos formatos, no obstante, consideran que el menú es poco llamativo. Además, un 90% de los estudiantes consideran que la herramienta evalúa las variables más pertinentes en el diseño de un proceso, mientras que el 10% restante opina que el programa lo hace parcialmente.

Respecto a los resultados generados por la herramienta informática, en la Figura 26 se expone la opinión de los estudiantes sobre varios aspectos del reporte.

Figura 26. Resultados de la encuesta sobre el reporte de resultados del AUDIPRO en la primera sesión.



Como se observa en la Figura 26, el reporte de resultados del AUDIPRO presenta fortalezas en todos sus aspectos. La característica menos fuerte es la visualización de los resultados, esto se debe a los errores que se presentaron por la escala de las gráficas y el cruce de información entre distintos tipos de equipos en el reporte detallado por tipo de equipo. Sin embargo, todos los aspectos evaluados del reporte superan el 78% de aprobación con opiniones de “Muy bueno” o “bueno”, pese a que hubo opiniones de “regular” para los cuatro aspectos evaluados del reporte, no hubo quien estableciera una opinión mala para alguno de los aspectos.

En cuanto a la utilidad de la herramienta para el ejercicio académico, los estudiantes están de acuerdo con usar la herramienta en las asignaturas de diseño del programa de Ingeniería Química, ya que como se evidencia en la encuesta (ver anexo I) les permitiría ahorrar desde un 30 a un 50% del tiempo que normalmente se tardan corrigiendo el diseño de un proceso.

En la segunda sesión de la evaluación externa, la herramienta fue utilizada por 26 estudiantes de la asignatura Análisis de Procesos durante el primer semestre de 2019. Al igual que en la primera sesión, los estudiantes usaron las tablas PFD del diseño del proceso de su proyecto de clase con el fin de verificar el funcionamiento de la herramienta y opinar sobre las características y funciones de esta.

Reporte de errores y fallas de ejecución en la segunda sesión

Después de la primera sesión con los estudiantes se corrigió la mayoría de los errores detectados por los estudiantes, en esta segunda sesión fueron menos las fallas que presentó el programa, no obstante, las fallas encontradas en la segunda sesión se describen a continuación:

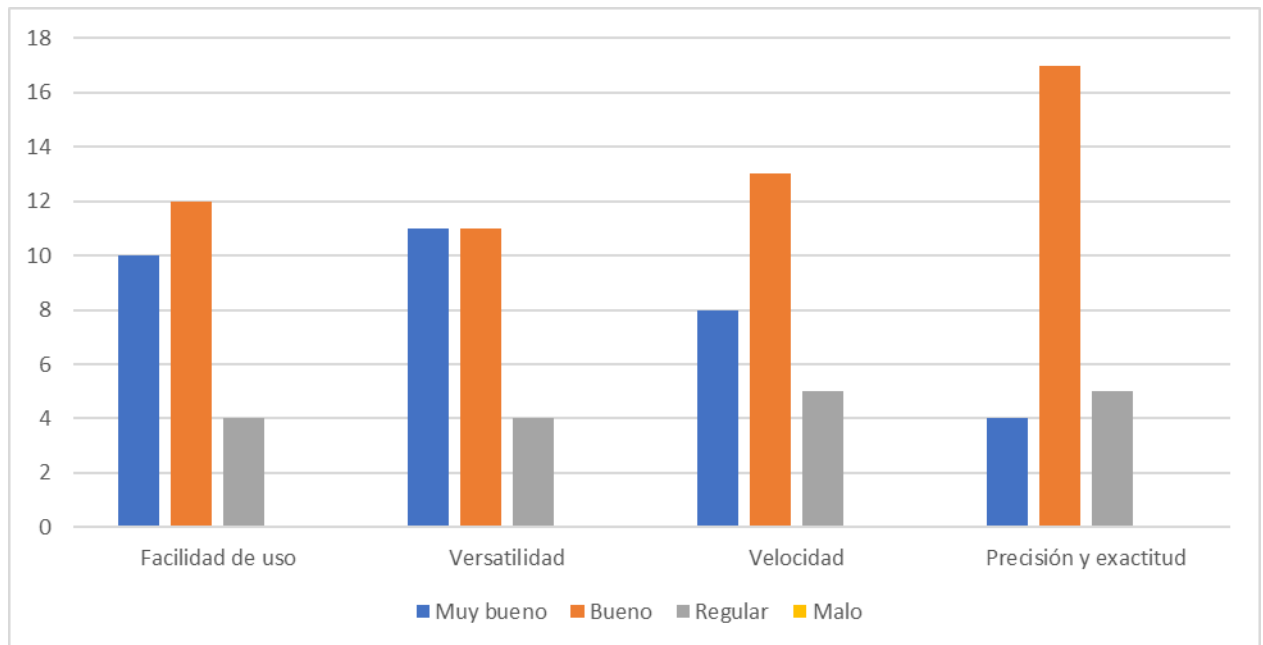
- Al manipular las opciones de la interfaz algunos botones y otros elementos como listas desplegables, desaparecen de la interfaz.
- Errores en las etiquetas de texto de algunos elementos mostrados en el reporte de generalidades del proceso.
- En el reporte de errores encontrados por propiedad, aparecen propiedades que ni siquiera fueron evaluadas por alguna regla de heurística.
- En algunas ocasiones, al ejecutar el programa aparece el siguiente mensaje de error: “se ha producido un error ‘1004’ en tiempo de ejecución. Error definido por aplicación o el objeto.

Resultados de la encuesta y sugerencias de la segunda sesión

Al igual que en la primera sesión, en esta oportunidad también se observaron resultados favorables (ver anexo I). Nuevamente la totalidad de los estudiantes encuestados reconocieron la necesidad de que exista una herramienta que revise los diseños de procesos confrontándolos con el cumplimiento de reglas de heurística. Además, tal como se muestra en la Figura 27, el programa mantuvo las

fortalezas destacadas en la primera sesión. No obstante, los estudiantes también hicieron algunas recomendaciones y sugerencias.

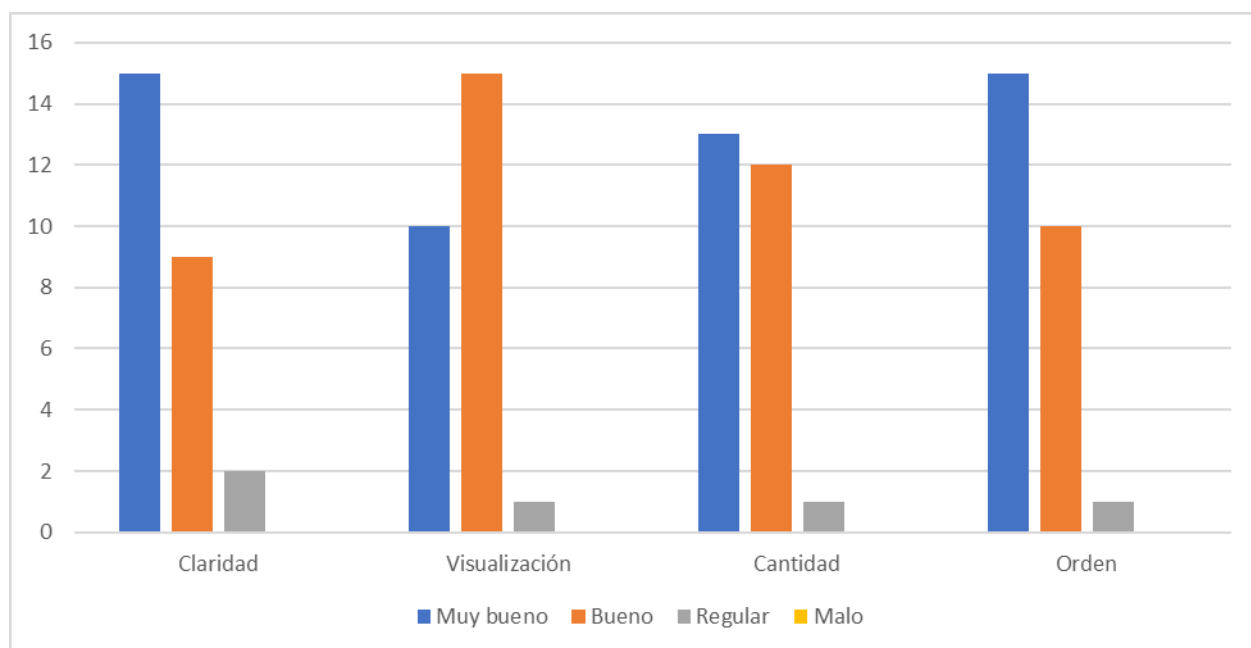
Figura 27. Resultados de la encuesta sobre el desempeño del AUDIPRO en la segunda sesión.



En esta sesión la totalidad de los estudiantes también opinaron que la herramienta evalúa variables pertinentes del diseño de un proceso y que los formatos de las tablas PFD de corrientes y de equipos son fáciles de diligenciar (ver anexo I).

La opinión sobre los principales aspectos del reporte de errores se observa en la Figura 28, dónde al igual que en la primera sesión, en esta oportunidad también son evidentes las fortalezas del AUDIPRO en términos de calidad, visualización, cantidad y orden de los resultados.

Figura 28. Resultados de la encuesta sobre el reporte de resultados del AUDIPRO en la segunda sesión.



En esta sesión todos los aspectos evaluados del reporte superan el 92% de aprobación con opiniones de “Muy bueno” o “bueno”, presentando sólo dos opiniones de “regular” en el aspecto “Claridad” y una de “regular” en el resto de los aspectos del reporte; al igual que en la primera sesión no hubo quien estableciera una opinión mala para cualquiera de los aspectos. En esta sesión los estudiantes establecieron más calificaciones de “Muy bueno”, lo que indica que los cambios y correcciones hechas después de la primera sesión fueron acertadas y permitieron mejorar la opinión de los estudiantes sobre la herramienta. La “visualización” fue el aspecto menos fuerte en la primera sesión, sin embargo, en esta sesión es evidente la mejoría que tuvo el AUDIPRO en este aspecto, ya que obtuvo un porcentaje mayor de opiniones positivas (ver anexo I).

En cuanto a la utilidad de la herramienta, todos los estudiantes resaltaron que usarían el AUDIPRO en la actividad laboral como ingenieros químicos, para encontrar errores en el diseño de procesos. Es importante resaltar que todos los diseños de procesos evaluados, tanto los de los casos de estudio como de los

estudiantes, corresponden a diseños ya simulados, pese a esto, al ser evaluados mediante el AUDIPRO todos presentaron errores de incumplimiento de reglas de heurística. Lo anterior sugiere que no se debe confiar ciegamente en los resultados de una simulación y junto con las opiniones de la encuesta, se reafirma la necesidad de que se haya desarrollado un programa como AUDIPRO

Con el fin de realizar mejoras en la versión posterior del programa, se tuvieron en cuenta las sugerencias generales que fueron consignadas por los estudiantes en las encuestas, estas se presentan a continuación:

- Mejorar la velocidad del tiempo de carga del programa
- Incluir más tipos de equipos en el formato de la tabla PFD de equipos
- Buscar en la literatura heurísticas de material de construcción para los equipos a los que les hace falta
- Incluir un algoritmo que permita evaluar el paquete de fluidos usado para realizar la simulación del diseño
- Agregar cuadros de textos con resumen de lo que hace cada botón o elemento interactivo de la interfaz.

3.3.3. Acciones correctivas y arreglos finales. El algoritmo de las gráficas de reporte se corrigió para que el usuario pudiera observar con claridad todos los valores de las propiedades de los equipos a los que se les esté aplicando la regla de heurística. Para esto, si los valores están muy alejados de los límites impuestos por la regla de heurística, se prescinde de mostrar los límites como líneas en la gráfica, ya que, si se presentara algún error, este se indicaría con los colores de las barras.

Con el fin de que no hubiese errores al cargar las tablas PFD de equipos o de corrientes, se programó un algoritmo que extrae los datos directamente de las tablas PFD del proceso que el usuario desea evaluar, siempre y cuando estén en el formato de una típica hoja de cálculo, requerido por el software AUDIPRO.

Antes los valores de las tablas eran copiados al archivo del programa y por eso se presentaban errores con las tablas que contenían vínculos, no obstante, la lectura remota de las tablas PFD corrigió este error a cabalidad.

Al revisar el algoritmo que imprime las gráficas y tablas del reporte detallado por equipo, se observaron varias falencias que, entre otras cosas, provocaban el cruce de información entre tipos distintos de equipos. El algoritmo se corrigió para que antes de empezar una nueva sección de reporte detallado, el programa revise que todos los vectores y matrices usados para graficar estén vacíos, de esta forma se evita que se impriman gráficas y tablas en secciones equivocadas.

Para facilitarle al usuario la selección de las unidades para cada propiedad, se programó un algoritmo que crea una lista desplegable con las opciones de las unidades correspondientes para cada propiedad, así el usuario no corre el riesgo de ingresar unidades en una sintaxis no compatible con la del programa.

El bloqueo y la lentitud de carga al iniciarse el programa, se debía a la presencia de líneas de código residuales que trataban de ejecutarse. Esto se solucionó ordenando cada sección del algoritmo y eliminando las líneas de programación sobrantes del AUDIPRO.

3.4. CONCLUSIONES

Todos los casos de estudio de la evaluación interna presentaron errores heurísticos, aun cuando 3 de estos casos fueron tomados de la bibliografía. Esto demuestra que es frecuente que se cometan errores heurísticos que no son advertidos por los simuladores y se destaca el hecho de que el AUDIPRO si puede detectarlos. Una gran parte de las fallas detectadas en la evaluación interna estaban relacionadas con la lectura de los datos que se deben consignar en las tablas PFD de equipos y corrientes del proceso a evaluar.

Fue correcto realizar pruebas con los estudiantes, esto permitió utilizar la herramienta masivamente para poder encontrar fallas que no se evidenciaron en la evaluación interna, además permitió recolectar opiniones sobre la experiencia del uso del AUDIPRO y sobre el impacto que podría tener tanto en la actividad académica como en la laboral. La herramienta informática tuvo un desempeño destacable, pese a presentar algunas fallas que luego fueron corregidas, el 100% los estudiantes justificaron el desarrollo de este proyecto, debido a la importancia de verificar el cumplimiento de reglas de heurística con el fin de acercar más el diseño del proceso a la realidad. Los aspectos de la herramienta que presentaron mayor fortaleza son la velocidad de ejecución, la facilidad de uso y la visualización, calidad y orden del reporte de errores.

Los resultados de la encuesta revelaron la importancia de haber desarrollado esta herramienta informática. Las opiniones de los estudiantes sobre la herramienta destacan el hecho de que el programa puede revisar un gran número de reglas de heurística en todos los equipos y corrientes del proceso en un tiempo menor a cuatro minutos.

4. CONCLUSIONES GENERALES

En la revisión del estado del arte no se encontró ninguna herramienta disponible abierta o comercialmente, que permita verificar el cumplimiento de reglas de heurística en el diseño de todo un proceso químico, lo que justifica y reafirma la necesidad que suple el desarrollo de esta herramienta, y por ende la importancia de esta investigación.

Fue posible construir un algoritmo genérico y estandarizado que permite evaluar todos los distintos tipos de heurística encontrados en la literatura, partiendo de las tablas PFD del proceso y usando una serie de comandos que permiten agregar nuevas reglas de heurística.

La implementación de la herramienta informática AUDIPRO tiene utilidad tanto en el ejercicio académico en las asignaturas o proyectos que involucren el diseño de procesos o equipos, como en la actividad industrial para realizar diseños que se acerquen más al comportamiento real del proceso. La programación de la generación automática de un reporte con gráficas y tablas le permite al usuario observar con mayor facilidad en que aspectos del proceso se concentran las inconsistencias heurísticas y de diseño, así se puede realizar un análisis más concluyente sobre el diseño del proceso.

Tras la evaluación interna y externa de la herramienta, se puso en evidencia que los diseños de procesos realizados mediante simuladores convencionales contienen incongruencias heurísticas que sí pueden ser detectadas por el AUDIPRO, de lo anterior es posible concluir que el desarrollo de esta herramienta informática fue un éxito. La mayoría de las opiniones fueron positivas respecto a las distintas características de la herramienta que fueron evaluadas, sin embargo, se destacan la velocidad de ejecución, su usabilidad y la calidad de la presentación de los resultados. Las fallas encontradas tanto en la evaluación

interna como externa permitieron hacer correcciones y mejoras para obtener una versión más confiable del AUDIPRO. No obstante, no fue posible atender todas las sugerencias realizadas, estas esperan tenerse en cuenta para desarrollar una versión aún más completa más allá del desarrollo de este proyecto

5. RECOMENDACIONES

Pese a que en el desarrollo de la herramienta informática AUDIPRO y en la evaluación de esta, se tuvieron en cuenta la mayoría de las sugerencias establecidas, se podrían hacer otras mejoras que harían que el programa fuera más versátil, con base en esto se hacen las siguientes recomendaciones:

- Implementar un reporte gráfico para las reglas de heurística que evalúan tipología, materiales de construcción y para las que son de carácter multicriterio.
- Incrementar la cantidad de reglas de heurística relacionadas con el material de construcción de los equipos y la naturaleza del fluido para implementar por defecto en el AUDIPRO.
- Integrar una interfaz gráfica que permita mostrar en el diagrama de flujos del proceso las fallas presentes en el diseño de este.

REFERENCIAS

1. VEGA P, LAMANNA DE ROCCO R, REVOLLAR S, FRANCISCO M. *Integrated design and control of chemical processes – Part I: Revision and classification*; 2014; 71: p. 602-617
2. DIMIAN AC, BILDEA CS, KISS AA. *Integrated Process and Product Design*. In: *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*. Elsevier B.V; 2014; p. 1–33.
3. RICARDEZ-SANDOVAL LA, BUDMAN HM, DOUGLAS PL. *Integration of design and control for chemical processes: A review of the literature and some recent results*; 2009. 33: p. 158–71.
4. BABU BV. *Process Plant Simulation. Chap 13*. In India: Oxford University Press; 2004.
5. DAHM KD, HESKETH RP, SVELSKI MJ. *Is Process Simulation Used Effectively in ChE Courses?*. In: *Chem Eng Educ*; 2002; p. 192–198.
6. GIL I, CASTRO P, SIERRA D. *Tutorial de análisis y simulación de procesos en estado estable y dinámico* [Internet]. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia; 2012.
7. SILVERSTEIN DL. *Process Simulation Failure as a Learning Tool*. American Society of Engineering Education; 2004. p. 1–10.
8. DIMIAN AC, BILDEA CS, KISS AA. *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*. *Comput Aided Chem Eng*. 2014; 35: p. 703–15.
9. SCENNA NJ. *Introducción a los métodos informáticos aplicados al modelado en ingeniería*. In: *Modelado, Simulación y optimización de procesos químicos*. Buenos Aires: Springer Books; 1999. p. 1–28.

10. MANNAN MS. *Process Design*. In: Butterworth-Heinemann, editor. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification Assessment and Control*. 4th ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier B.V.; 2012.
11. SCENNA NJ, BENZ SJ. *Introducción al Diseño de Procesos Químicos. Breves Nociones*. In: Modelado, Simulación y optimización de procesos químicos. Buenos Aires: Springer Books; 1999. p. 29–82.
12. MORAN S. *Process Plant Design: An Applied Guide to Process and Plant Design*. Elsevier Inc; 2015. p. 5–20.
13. GARGALO CL, CHAIRAKWONGSA S, QUAGLIA A, GANI R. *Methods and tools for sustainable chemical process design: Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*. Bangkok, Thailand: Elsevier Inc; 2015. p. 280.
14. HOCKING D, NOUGUÉS JM, RODRÍGUEZ JC, SAMA S. *Simulation, Design y Analysis*. In: Elsevier, editor. *Software Architectures and Tools for Computer Aided Process Engineering. Computer Aided Chemical Engineering*; 2002. p. 165–191.
15. DIMIAN AC. *Introduction in process simulation*. In: Elsevier B.V., editor. *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*. Amsterdam, Netherlands: Computers & Chemical Engineering; 2007. p. 35–71.
16. WATSON DR, DZIRBIK D, RUDOLPH J, JOGLEKAR GS. *The integration of process simulation in operational analysis*. *Comput Chem Eng*. 2000; 24: p. 607–12.
17. DIMIAN A. *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*. *Comput Aided Chem Eng*. 2003;35: p. 698.
18. MORAN S. *Twenty-First Century Process Plant Design: An Applied Guide to Process and Plant Design*. Elsevier Inc; 2015. p. 53–68.
19. SEIDER W, SEADER J, LEWIN DR. *Product and process design principles*. In: 2nd ed. United States of America: Wiley; 2004.

20. SHAEIWITZ JA, TURTON R. *Process Simulators: What students forget when using them, their limitations, and when not to use them*. Comput Aided Chem Eng. 2015; 37(December): p. 149–154.
21. FLACH L. *Experiences with teaching design. Do we blend the old with the new?*. In: Chemical Engineering Education. 1999; 33: p. 158–162.
22. EDWARDS VH, SEL BJ, LE ND. *Doublecheck Your Process Simulations*. Chem Eng Prog. 2000; 96: p. 51–52.
23. SADEQ J, DUARTE HA, SERTH RW. *Anomalous results from process simulators*. Chem Eng Educ. 1997; (Winter): p. 46–51.
24. KISTER HZ. *Does your Distillation Simulation Reflect the Real World?* *Hydrocarb Proc*. 1997; 103(August).
25. KISTER HZ. *Troubleshoot Distillation Simulations*. Chem Eng Prog. 1995; 91(June): p. 63.
26. SAVELSKI MJ, HESKETH RP. *Issues Encountered with Students using Process Simulators*. New Jersey: American Society of Engineering Education; 2003. p. 8.794.1-8.794.27.
27. HOCKING D, NOUGUÉS JM, RODRÍGUEZ JC, SAMA S. *Simulation, Design y Analysis*. In: Elsevier, editor. *Software Architectures and Tools for Computer Aided Process Engineering*. Computer Aided Chemical Engineering; 2002. p. 165–191.
28. SHAEIWITZ JA, TURTON R. *Are Your Students Getting the Most out of the Process Simulator?* In: 122nd ASEE Annual Conference & Exposition. Seattle; 2015. p. 1–7.
29. PÄRTTÖ M, SAARILUOMA P. *Explaining failures in innovative thought processes in engineering design*. Procedia - Soc Behav Sci [Internet]. 2012; 41: p. 442–449.

30. AGARWAL R, LI Y-K, SATYRO MA, VIELER A. *Uncovering the realities of simulation. Part 1*. Chem Eng Prog [Internet]. 2001; (May):42–52. Available from: www.aiche.org/cep/
31. KISTER HZ, FLUOR D. *Can We Believe the Simulation Results?*. Chem Eng Prog. 2002; (October): p. 52–58.
32. TURTON R, BAILIE R, WHITING W, SHAEIWITZ J, DEBANGSU B. *Utilizing experience-based principles to confirm the suitability of a process design*. 4th ed. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Prentice Hall; 2012. p. 1–5.
33. SEIDER WD, SEADER JD, LEWIN DR, WIDAGDO S. *Product and Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2016.
34. COUPER JR, FAIR JR, ROY Penney W, WALAS SM. *Chemical Process Equipment Selection and Design*. Second. Gulf Professional Publishing; 2011.
35. SANSANO MF. *Diseño de una Columna de DME. PFC/TFG*. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena; 2005.
36. PUENTE E, LÁZARO M, ABREU O, CAPOTE JA, ALVEAR D. *Aplicación de un algoritmo evolutivo para la optimización del modelado computacional de la pirólisis de materiales*. Rev Internacional de Métodos Numéricos para Calcular y Diseñar en Ingeniería. 2013; 29: p. 208–214.
37. SONG D, YOON ES, JANG N. *A framework and method for the assessment of inherent safety to enhance sustainability in conceptual chemical process design*. J Loss Prev Process Ind. 2018; 54: p. 10–17.

38. VARGAS E, GUERRERO V. *Elaboración de una herramienta informática para la estimación de costos de capital de equipos fundamentales en plantas d eprocesos químicos*. Trabajo de grado. Univ Ind Santander. 2014.
39. BRANAN C. *Rules of thumb for chemical engineers*. Fourth edition. Houston;TX: Butterworth-Heinemann; 2012.
40. TURTON R, BAILIE R, WHITING W, SHAEIWITZ J. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Third. Vol. 91. Boston, MA: Prentice Hall; 2017. p. 399–404.
41. FILATOVA I. *Evaluación de herramientas y recursos informáticos (TAO y OFIMÁTICA) para la traducción profesional*. Tesis de maestría. Univ Málaga. 2010.
42. GONZÁLEZ Gil G. *Modelado y simulación de una planta de producción de etanol por hidratación directa de etileno*. Univ Sevilla. 2011; 90.
43. HERNÁNDEZ F, REYES I. *Diseño de una planta industrial para la producción de surfactantes aniónicos a partir de aceite de palmiste y análisis del impacto técnico-económico-ambiental del proceso a escala industrial*. Tesis de grado. Univ Ind Santander. 2006.

BIBLIOGRAFÍA

AGARWAL R, LI Y-K, SATYRO MA, VIELER A. *Uncovering the realities of simulation. Part 1*. Chem Eng Prog [Internet]. 2001; (May):42–52. Available from: www.aiche.org/cep.

BABU BV. *Process Plant Simulation. Chap 13*. In India: Oxford University Press; 2004.

BRANAN C. *Rules of thumb for chemical engineers*. Fourth edition. Houston;TX: Butterworth-Heinemann; 2012.

COUPER JR, FAIR JR, ROY Penney W, WALAS SM. *Chemical Process Equipment Selection and Design*. Second. Gulf Professional Publishing; 2011.

DAHMANI KD, HESKETH RP, SAKELSKI MJ. *Is Process Simulation Used Effectively in ChE Courses?*. In: Chem Eng Educ; 2002; p. 192–198.

DIMIAN A. *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*. Comput Aided Chem Eng. 2003;35: p. 698.

DIMIAN AC, BILDEA CS, KISS AA. *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*. Comput Aided Chem Eng. 2014; 35: p. 703–15.

DIMIAN AC, BILDEA CS, KISS AA. *Integrated Process and Product Design*. In: Integrated Design and Simulation of Chemical Processes. Elsevier B.V; 2014; p. 1–33.

DIMIAN AC. *Introduction in process simulation*. In: Elsevier B.V., editor. Integrated Design and Simulation of Chemical Processes. Amsterdam, Netherlands: Computers & Chemical Engineering; 2007. p. 35–71.

EDWARDS VH, SEL BJ, LE ND. *Doublecheck Your Process Simulations*. Chem Eng Prog. 2000; 96: p. 51–52.

FILATOVA I. *Evaluación de herramientas y recursos informáticos (TAO y OFIMÁTICA) para la traducción profesional*. Tesis de maestría. Univ Málaga. 2010.

FLACH L. *Experiences with teaching design. Do we blend the old with the new?*. In: Chemical Engineering Education. 1999; 33: p. 158–162.

GARGALO CL, CHAIRAKWONGSA S, QUAGLIA A, GANI R. *Methods and tools for sustainable chemical process design: Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*. Bangkok, Thailand: Elsevier Inc; 2015. p. 280.

GIL I, CASTRO P, SIERRA D. *Tutorial de análisis y simulación de procesos en estado estable y dinámico [Internet]*. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia; 2012.

GONZÁLEZ Gil G. *Modelado y simulación de una planta de producción de etanol por hidratación directa de etileno*. Univ Sevilla. 2011; 90.

HERNÁNDEZ F, REYES I. *Diseño de una planta industrial para la producción de surfactantes aniónicos a partir de aceite de palmiste y análisis del impacto técnico-económico-ambiental del proceso a escala industrial*. Tesis de grado. Univ Ind Santander. 2006.

HOCKING D, NOUGUÉS JM, RODRÍGUEZ JC, SAMA S. *Simulation, Design y Analysis*. In: Elsevier, editor. Software Architectures and Tools for Computer Aided Process Engineering. Computer Aided Chemical Engineering; 2002. p. 165–191.

HOCKING D, NOUGUÉS JM, RODRÍGUEZ JC, SAMA S. *Simulation, Design y Analysis*. In: Elsevier, editor. Software Architectures and Tools for Computer Aided Process Engineering. Computer Aided Chemical Engineering; 2002. p. 165–191.

KISTER HZ, FLUOR D. *Can We Believe the Simulation Results?*. Chem Eng Prog. 2002; (October): p. 52–58.

KISTER HZ. *Does your Distillation Simulation Reflect the Real World?*. Hydrocarb Proc. 1997; 103 (August).

KISTER HZ. *Troubleshoot Distillation Simulations*. Chem Eng Prog. 1995; 91(June): p. 63.

MANNAN MS. *Process Design*. In: Butterworth-Heinemann, editor. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification Assessment and Control*. 4th ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier B.V.; 2012.

MORAN S. *Process Plant Design: An Applied Guide to Process and Plant Design*. Elsevier Inc; 2015. p. 5–20.

MORAN S. *Twenty-First Century Process Plant Design: An Applied Guide to Process and Plant Design*. Elsevier Inc; 2015. p. 53–68.

PÄRTTÖ M, SAARILUOMA P. *Explaining failures in innovative thought processes in engineering design*. *Procedia - Soc Behav Sci [Internet]*. 2012; 41: p. 442–449.

PUENTE E, LÁZARO M, ABREU O, CAPOTE JA, ALVEAR D. *Aplicación de un algoritmo evolutivo para la optimización del modelado computacional de la pirólisis de materiales*. Rev Internacional de Métodos Numéricos para Calcular y Diseñar en Ingeniería. 2013; 29: p. 208–214.

RICARDEZ-SANDOVAL LA, BUDMAN HM, DOUGLAS PL. *Integration of design and control for chemical processes: A review of the literature and some recent results*; 2009. 33: p. 158–71.

SADEQ J, DUARTE HA, SERTH RW. *Anomalous results from process simulators*. Chem Eng Educ. 1997; (Winter): p. 46–51.

SANSANO MF. *Diseño de una Columna de DME. PFC/TFG*. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena; 2005.

SAVELSKI MJ, HESKETH RP. *Issues Encountered with Students using Process Simulators*. New Jersey: American Society of Engineering Education; 2003. p. 8.794.1-8.794.27.

SCENNA NJ, BENZ SJ. *Introducción al Diseño de Procesos Químicos. Breves Nociones*. In: Modelado, Simulación y optimización de procesos químicos. Buenos Aires: Springer Books; 1999. p. 29–82.

SCENNA NJ. *Introducción a los métodos informáticos aplicados al modelado en ingeniería*. In: Modelado, Simulación y optimización de procesos químicos. Buenos Aires: Springer Books; 1999. p. 1–28.

SEIDER W, SEADER J, LEWIN DR. *Product and process design principles*. In: 2nd ed. United States of America: Wiley; 2004.

SEIDER WD, SEADER JD, LEWIN DR, WIDAGDO S. *Product and Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2016.

SHAEIWITZ JA, TURTON R. *Are Your Students Getting the Most out of the Process Simulator?* In: 122nd ASCE Annual Conference & Exposition. Seattle; 2015. p. 1–7.

SHAEIWITZ JA, TURTON R. *Process Simulators: What students forget when using them, their limitations, and when not to use them*. Comput Aided Chem Eng. 2015; 37(December): p. 149–154.

SILVERSTEIN DL. *Process Simulation Failure as a Learning Tool*. American Society of Engineering Education; 2004. p. 1–10.

SONG D, YOON ES, JANG N. *A framework and method for the assessment of inherent safety to enhance sustainability in conceptual chemical process design*. J Loss Prev Process Ind. 2018; 54: p. 10–17.

TURTON R, BAILIE R, WHITING W, SHAEIWITZ J, DEBANGSU B. *Utilizing experience-based principles to confirm the suitability of a process design*. 4th ed. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Prentice Hall; 2012. p. 1–5.

TURTON R, BAILIE R, WHITING W, SHAEIWITZ J. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Third. Vol. 91. Boston, MA: Prentice Hall; 2017. p. 399–404.

VARGAS E, GUERRERO V. *Elaboración de una herramienta informática para la estimación de costos de capital de equipos fundamentales en plantas de procesos químicos*. Trabajo de grado. Univ Ind Santander. 2014.

VEGA P, LAMANNA DE ROCCO R, REVOLLAR S, FRANCISCO M. *Integrated design and control of chemical processes – Part I: Revision and classification*; 2014; 71: p. 602-617

WATSON DR, DZIRBIK D, RUDOLPH J, JOGLEKAR GS. *The integration of process simulation in operational analysis*. Comput Chem Eng. 2000; 24: p. 607–12.

ANEXOS

ANEXO A. Tabla de tipos y subtipos de equipos implementados en los formatos de la tabla PFD de equipos del AUDIPRO

Equipo (Equipment)	Tipo de equipo (Equipment type)
Bombas (Pumps)	Axial (Axial)
	Centrífuga horizontal (Horizontal centrifugal)
	Centrífuga vertical (vertical centrifugal)
	Desplazamiento positivo (Positive displacement)
	Reciprocante (Reciprocating)
	Rotatoria (Rotatory)
	Turbina (Turbine)
Compresores (Compressors)	Axial (Axial)
	Centrífugo (Centrifugal)
	Reciprocante (Reciprocating)
	Rotatorio (Rotatory)
Filtros (Filters)	Cartucho (Cartridge)
	Correa (Belt)
	Disco (Disc)
	Placa y bastidor (Plate and frame)
	Tambor (Drum)
Hornos (Furnaces)	Fuego directo (Fired heater)
	Pirólítico (Pyrolysis)
	Reformador (Reformer)
Impulsores (Drivers)	Motor de Combustión interna (Internal combustion)
	Motor eléctrico (Electric motor)
	Turbina (Turbine)
	Turbina a vapor (Steam Turbine)
Intercambiadores de calor (Heat exchangers)	Carcasa y tubo (Shell and tube)
	Doble tubo (Double tube)
	Espiral (Espiral tube)
	Placas (Plates)
	Tubo en U (U Tube)
Reactores (Reactors)	Autoclave (Autoclave)
	Enchaquetado (Jacketed)
	Tanque agitado (Agitated tank)
	Tubular (Tubular)
Recipientes de procesos (Vessels)	Horizontal (Horizontal)
	Vertical (Vertical)
Tanques (Tanks)	Horizontal (Horizontal)
	Vertical (Vertical)
Torres (Towers)	Empacadas (Packed)
	Platos (Trays)
Turbinas (Turbines)	Gas axial (Axial gas turbines)
	Gas Radial (Radial Gas)
Ventiladores (Fans)	Aleta axial (Axial vane)
	Centrífugo radial (Centrifugal radial)
	Curvado hacia atrás (Backward curve)
	Tubo axial (Axial tube)

ANEXO B. Formatos de tablas PFD de corrientes y equipos (ejemplo diligenciado)

Ejemplo del formato de la tabla PFD de equipos:

TABLA PFD DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO											
Corrientes	Unidades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Entra al equipo		P-101A/B	MIX-101	E-101	E-102	R-201A/B	E-301	E-302	E-303	V-301	VLV-301
Sale del equipo		TK-101	P-101A/B	MIX-101	E-101	E-102	R-201A/B	E-301	E-302	E-303	V-301
FV		0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.41	1.00
T	°C	25.00	25.20	32.39	42.66	243.00	362.60	208.00	85.50	30.00	29.81
P	kPa	101,3	50.13	501.30	451.30	406.30	386.30	348.30	314.30	283.30	278.30
Fmas	kg/h	4,611.00	4,610.99	5,163.37	5,163.00	5,163.00	5,163.00	5,163.00	5,163.00	5,163.00	572.00
Fmol	kmol/h	98.00	98.00	110.80	110.80	110.80	175.30	175.30	175.30	175.30	72.62
Fvol	m3/h	5.88	5.88	6.63	6.73	1,171.00	2,399.00	2,014.00	1,571.00	651.00	657.30
Fraccion masica por componente											
Agua		0.119	0.119	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.025
Acetona		0.000	0.000	0.035	0.035	0.035	0.761	0.761	0.761	0.761	0.722
Hidrogeno		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.025	0.025	0.025	0.227
2 - propanol		0.881	0.881	0.841	0.841	0.841	0.090	0.090	0.090	0.090	0.026
BiPhenyl		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
DiPH-Ether		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Metano		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Oxigeno		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nitrogeno		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Monoxido de carbono		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dioxido de carbono		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Propano		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Ejemplo del formato de la tabla PFD de equipos:

Cabe aclarar que en este ejemplo no se muestran todos los equipos disponibles en el formato, sino solo los que pertenecen al proceso del ejemplo. Todos los equipos disponibles en el formato se observan en el anexo A.

TABLA DE EQUIPOS					
BOMBAS	Sigla	Unidades	P-101A/B	P-201A/B	P-301A/B
Tipo	-		Centrífuga	Desplazamiento positivo	Centrífuga
Temperatura	T	°C	25	200	94.38
Flujo volumétrico	Fv	m ³ /h	5.88	24.59	0.76
Presión de descarga	P	bar	5.01	4.00	5.01
Eficiencia	E	%	75	75	75
Diferencia de Presión	DP	bar	4.00	0.40	2.55
Potencia	W	kW	0.870	0.364	0.072
Tipo driver (impulsor)	-		Motor Eléctrico	Motor Eléctrico	Motor Eléctrico
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Misco C	Misco C	Misco C
COMPRESORES	Sigla	Unidades	C-301A/B		
Tipo	-		Reciprocante		
Flujo volumétrico	Fv	m ³ /h	1,891		
Temperatura	T	°C	-41.00		
Presión de descarga	P	bar	111.7		
Relación de compresión	Rc		1.17		
Eficiencia	E	%	75		
Potencia	W	kW	25.98		
Tipo driver (impulsor)	-		Motor electrico		
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Cast Steel		
HORNOS	Sigla	Unidades	H-201		
Tipo	-		Fuego directo		
Temperatura en los tubos	Tt	°C	299		
Presión en los tubos	Pt	bar	4.0		
Energía bruta	Eb	kWt	5.13E+06		
Área zona radiante	Ar	m ²	26.89		
Área zona convectiva	Ac	m ²	7.65		
Eficiencia térmica	Et	%	75		
Tipo combustible	-		Gas Natural		
% Aire en exceso	Aexc	%	20		
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Cast Steel		
INTERCAMBIADORES DE CALOR	Sigla	Unidades	E-101	E-102	E-301
Tipo	-		Carcasa y tubo	Carcasa y tubo	Carcasa y tubo
Tipo Operación	-		Calentamiento	Calentamiento	Enfriamiento
Área transferencia de calor	A	m ²	68.00	67.99	67.84
Coeficiente transf. calor (U)	U	W/(m ² *K)	27.97	453.33	90.86
Flujo de Energía transferida	Q	kW	4.86E+01	1.88E+03	5.19E+02

Carcasa:					
Temperatura	Tc	°C	116.50	42.66	362.60
Presión	Pc	bar	0.28	0.45	0.38
Fase (Líquido, Vapor, Mezcla)	-		Líquido	Líquido-Vapor	Vapor
Naturaleza del fluido	-	-			
Material de Construcción	-		Cast Steel	Cast Steel	Cast Steel
Tubos:					
Temperatura	Tp	°C	32.29	265.00	160.00
Presión	Pp	bar	0.50	4.20	0.60
Fase (Líquido, Vapor, Mezcla)	-		Líquido	Vapor-Líquido	Vapor
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Cast Steel	Cast Steel	Cast Steel
REACTORES	Sigla	Unidades	R-201		
Tipo	-		Tubular		
Temperatura	T	°C	362.6		
Presión	P	bar	386.3		
Altura del reactor	h	m	13.81		
Diámetro del reactor	D	m	1.38		
Nivel	N		0.5		
Volumen de Reacción	Vr	m ³	20.67		
Número de tubos (PFR)	nT		2,954		
Diámetro de cada tubo (PFR)	Dt	m	2.54E-02		
Espesor pared	Esp	mm	5		
Orientación (vertical, horizontal)	-		Horizontal		
Nombre/Tipo de catalizador	-		Niguel Raney		
% Conversión	%C	%	89.26		
Tiempo de residencia	Tr	min	7.476		
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Cast Steel		
RECIPIENTES DE PROCESOS	Sigla	Unidades	V-301	V-302	MIX-101
Tipo	-		Vertical	Vertical	Horizontal
Temperatura	T	°C	30.00	-37.00	32.29
Presión	P	bar	2.83	2.41	5.103
Longitud	L	m	3.59	2.74	0.692
Diámetro	D	m	0.85	0.57	0.495
Volumen	V	m ³	8.231	2.767	0.133
Espesor pared	Esp	mm	5.000	5.000	0.005
Orientación (vertical, horizontal)	-		Vertical	Vertical	Vertical
Tiempo de residencia	Tr	min	10	10	1
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Cast Steel	Cast Steel	Cast Steel
TANQUES	Sigla	Unidades	TK-101	TK-301	TK-302
Tipo	-		Vertical	Vertical	Vertical
Temperatura	T	°C	25	77.42	42
Presión	P	bar	1.10	1.10	1.10
Altura	L	m	11.33	11.00	5.33
Diámetro	D	m	7.55	7.33	3.55
Volumen	V	m ³	507.2402343	464.1843732	52.75623529
Espesor pared	Esp	mm	10	15	9
Orientación (vertical, horizontal)	-		Vertical	Vertical	Vertical
Naturaleza del fluido	-				
Material de Construcción	-		Cast Steel	Cast Steel	Cast Steel

ANEXO C. Clasificación y organización de las reglas de heurística implementadas en el programa

BOMBAS

Material de construcción recomendado para bombas de acuerdo a la naturaleza del fluido [34]

Material	Naturaleza de las corrientes
Hierro fundido	Amoniaco, anhídrido y agua
	Benceno
	Carbono tetracloruro
	Soda cáustica 10%
	Etílica
	Metílica
Níquel resistente	Salmuera (Cloruro de sodio)
Carcasa: Acero al carbono-Anillos: Hierro	Butadieno
	Propílica
Misco C	Cáustica 50% Max. Temp 200°F
Níquel	Cáustica 50% 200°F y 73%
Acero al carbono	Etileno
Bronce	Etileno-glicol
Carbón impregnado	Ácido clorhídrico 32%
Acero al carbono forrado de goma	Ácido clorhídrico 32%

Intervalo de flujo para bombas según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [gpm]	Valor máximo [gpm]
Bombas	Centrífuga (horizontal)	1	2000
	Centrífuga (vertical)	5	80000
	Axial	20	10000
	Reciprocante	5000	N/A
	Tipo turbina	1	2000
	Rotatoria	1	5000

Cabeza máxima para bombas según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor máximo [ft]
Bombas	Centrífuga (horizontal)	5495
	Centrífuga (vertical)	6004
	Axial	39
	Reciprocante	170000
	Tipo turbina	2493
	Rotatoria	11155

Presión máxima para bombas según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor máximo [psi]
Bombas	Centrífuga (horizontal)	10000
	Centrífuga (vertical)	2000
	Axial	150
	Reciprocante	50000
	Tipo turbina	2500
	Rotatoria	3000

Temperatura máxima para bombas según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor máximo [°F]
Bombas	Centrífuga (horizontal)	1004
	Centrífuga (vertical)	500
	Axial	149
	Reciprocante	572
	Tipo turbina	249
	Rotatorias	653

Intervalo de NPSH para bombas según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [ft]	Valor máximo [ft]	Valor único [ft]
Bombas	Centrífuga (horizontal)	0.98	24.9	
	Centrífuga (vertical)	0.98	39.4	
	Axial			6.56
	Reciprocante	12.1	15.1	
	Tipo turbina	6.56	8.20	9.84

Intervalo de eficiencia para bombas según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [%]	Valor máximo [%]
Bombas	Centrífuga (horizontal)	20	90
	Centrífuga (vertical)	10	90
	Axial	65	85
	Reciprocante	20	85
	Tipo turbina	55	85
	Rotatoria	50	80

Intervalo de temperatura para bombas [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [°F]	Valor máximo [°F]
Bombas	Centrífuga (horizontal)		
	Centrífuga (vertical)		
	Axial	-200	400
	Tipo turbina		

Intervalo de potencia para bombas reciprocantes, centrífugas y de desplazamiento positivo [39]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Bombas	Centrífuga (horizontal)		
	Centrífuga (vertical)		
	Reciprocante	0.1	250
	Desplazamiento positivo		

Intervalo de presión para bombas reciprocantes [40]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [bar]	Valor máximo [bar]
Bombas	Reciprocante	0	1000

Intervalo de potencia para bombas rotatorias y de desplazamiento positivo [38]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Bombas	Rotatorias	0.1	150
	Desplazamiento positivo		

Intervalo de presión para bombas rotatorias, centrífugas y de desplazamiento positivo [40]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Bombas	Rotatorias	0.1	150

COMPRESORES

Intervalo de eficiencia para compresores según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [%]	Valor máximo [%]
Compresores	Centrífugo	20	90
	Reciprocante	10	90
	Rotatorio	65	85

Intervalo de flujo para compresores según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [ft ³ /min]	Valor máximo [ft ³ /min]
Compresores	Centrífugo	500	190000
	Reciprocante	106	660
	Rotatorio	6000	30000

Relación de compresión mínima para compresores según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo
Compresores	Centrífugo	12
	Reciprocante	6
	Rotatorio	5

Intervalo de presión para compresores según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [psi]	Valor máximo [psi]
Compresores	Centrífugo	300	500
	Reciprocante	35000	50000

Relación de la eficiencia respecto a la relación de compresión para compresores reciprocantes [38]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Relación de compresión	Eficiencia [%]
Compresores	Reciprocante	1.5	65
		2	75
		3-6	80-85

Intervalo de potencia para compresores axiales, centrífugos y reciprocantes [40]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Compresores	Axial	50	8000
	Centrífugo		
	Reciprocante		

Intervalo de potencia para compresores rotatorios [40]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Compresores	Rotatorios	50	1000

Material de construcción recomendado para compresores de acuerdo a la naturaleza del fluido [39]

Material	Naturaleza de la corriente
Acero al carbono	Amoniaco, anhídrido y agua
	Benceno
	Carbono tetracloruro
	Soda cáustica 10%
	Etílica
	Metílica
Níquel resistente	Salmuera (Cloruro de sodio)
Carcasa: Acero al carbono	Butadieno
Anillos: Hierro	Propílica
Misco C	Cáustica 50% Max. Temp 200°F
Níquel	Cáustica 50% 200°F y 73%

IMPULSORES

Intervalo de eficiencia para impulsores según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [%]	Valor máximo [%]
Impulsores	Turbina a gas	28	38
	Turbina a vapor	28	38
	Motor de combustión	42	78
	Motor eléctrico	85	97

Intervalo de potencia para impulsores según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Impulsores	Turbina a gas	10	15000
	Turbina a vapor	100	15000
	Motor de combustión	10	15000
	Motor eléctrico	1	15000

Intervalo general de potencia para impulsores [39]

Equipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Impulsores	10	10000

Intervalo general de voltaje para impulsores [39]

Equipos involucrados	Valor mínimo [v]	Valor máximo [v]
Impulsores	220	13200

INTERCAMBIADORES DE CALOR

Intervalo de coeficiente de transferencia de calor para intercambiadores de calor según su tipo [34]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo [BTU/(ft ² *h*°F)]	Valor máximo [BTU/(ft ² *h*°F)]
Intercambiadores de calor	Carcaza y tubo	1	200
	Doble tubo	2	250
	Placas	3	200
	Espiral	120	660
	Tubo irrigado	3	200

Intervalo general de área para intercambiadores de calor [40]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m ²]	Valor máximo [m ²]
Intercambiadores de calor	10	1000

Intervalo general de longitud para intercambiadores de calor [40]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m]	Valor máximo [m]
Intercambiadores de calor	2.5	6.5

REACTORES

Recomendación de nivel para reactores

Equipos involucrados	Criterio heurístico
Reactores	Se recomienda que el nivel del contenido (n) del reactor sea igual al diámetro (D) de este

Material de construcción recomendado para reactores de acuerdo a la naturaleza del fluido [39]

Material	Naturaleza de la corriente
Níquel resistente	Salmuera (Cloruro de sodio)
Carcasa: Acero al carbono	Butadieno
Anillos: Hierro	Propílica
Misco C	Cáustica 50% Max. Temp 200°F
Níquel	Cáustica 50% 200°F y 73%

CALENTADORES

Intervalo de duty para calentadores en general [40]

Equipos involucrados	Valor mínimo [kW]	Valor máximo [kW]
Calentadores	2777.78	1388888.89

RECIPIENTES DE PROCESOS (VESSELS)

Intervalo general de tiempo de residencia para recipientes de procesos [40]

Equipos involucrados	Valor mínimo [min]	Valor máximo [min]
Recipientes de procesos	5	10

Intervalo general de altura para recipientes de procesos [40]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m]	Valor máximo [m]
Recipientes de procesos	2	50

Intervalo general de diámetro para recipientes de procesos [34]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m]	Valor máximo [m]
Recipientes de procesos	0.3	2

Relación longitud/diámetro (L/D) recomendada para recipientes de procesos [34]

Equipos involucrados	Valor único
Recipientes de procesos	3

Intervalo de relación longitud/diámetro (L/D) para recipientes de procesos [34]

Equipos involucrados	Valor mínimo	Valor máximo
Recipientes de procesos	2.5	5

Intervalo de relación longitud/diámetro (L/D) para recipientes de procesos [40]

Equipos involucrados	Valor mínimo	Valor máximo
Recipientes de procesos	2	5

TORRES

Intervalo de eficiencia de plato para torres [40]

Equipos involucrados	Subtipos involucrados	Valor mínimo	Valor máximo
Torres	Platos	10	90

Altura mínima para torres [39]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m]
Torres	1.75

Intervalo general de altura para torres [34]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m]	Valor máximo [m]
Torres	2	50

Intervalo de relación longitud/diámetro (L/D) para torres [38]

Equipos involucrados	Valor mínimo [m]	Valor máximo [m]
Torres	2	30

TANQUES

Espesor de pared respecto al diámetro para tanques de altas presiones [40]

Equipos involucrados	Diámetro [in]	Espesor [in]
Tanques	0.25	> 42
	0.32	42 -60
	0.38	60 <

Selección del tipo de tanque respecto a su capacidad volumétrica [38]

Equipos involucrados	Volumen [gal]	Tipo
Tanques	> 1000	Verticales
	1000-10000	Horizontales
	10000 <	Verticales

HEURÍSTICAS DE TOPOLOGÍA BÁSICA

Configuración horno - intercambiador de calor

Se recomienda instalar un intercambiador de calor para disminuir costos energéticos.



Intercambiador Horno

Topología general de fracción de vapor [39]

Fracción de vapor	Valor mínimo	Valor máximo
	0	1

Fracción de vapor para bombas y compresores [39]

Fracción de vapor	Valor único Bombas	Valor único Compresores
	0	1

CLASIFICACIÓN DE LAS REGLAS DE HEURÍSTICA IMPLEMENTADAS

Equipo	Regla de heurística	No. De criterios	Aplicada sobre	Tipo de evaluación	Estrategia de sistematización	Tipo de resultado
Bombas	Material de construcción de bombas de acuerdo con la naturaleza del fluido	2	Equipo	Comparar propiedades	Cualitativa	Recomendación
	Intervalo de flujo para bombas según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Cabeza máxima para bombas según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Presión máxima para bombas según su tipo	1	Equipo	Evalúa un límite	Cuantitativa	Advertencia
	Temperatura máxima para bombas según su tipo	1	Equipo	Evalúa un límite	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo en NPSH para bombas según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de eficiencia para bombas según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de temperatura para bombas	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de potencia para bombas reciprocantes, centrífugas y de desplazamiento positivo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de presión para bombas reciprocantes	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de potencia para bombas rotatorias y de desplazamiento positivo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de presión para bombas rotatorias, centrífugas y de desplazamiento positivo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Potencia teórica calculada para bombas	1	Equipo	Evalúa una ecuación	Cuantitativa	Advertencia

Clasificación de las reglas de heurística implementadas (Continuación)

Equipo	Regla de heurística	No. De criterios	Aplicada sobre	Tipo de evaluación	Estrategia de sistematización	Tipo de resultado
Compresores	Material de construcción de compresores de acuerdo con la naturaleza del fluido	2	Equipo	Comparar propiedades	Cualitativa	Recomendación
	Intervalo de eficiencia para compresores según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de flujo para compresores según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Relación de compresión mínima para compresores según su tipo	1	Equipo	Evalúa un límite	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de presión para compresores según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Relación de eficiencia respecto a la relación de compresión para compresores reciprocantes	2	Equipo	Comparar propiedades	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de potencia para compresores axiales, centrífugos y reciprocantes	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de potencia para compresores rotatorios	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
Impulsores	Intervalo de eficiencia para impulsores según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo de potencia para impulsores según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de potencia para impulsores	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de voltaje para impulsores	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Relación de voltaje respecto a la potencia para impulsores	2	Equipo	Evaluar rango y comparar propiedades	Cuantitativa	Advertencia

Clasificación de las reglas de heurística implementadas (Continuación)

Equipo	Regla de heurística	No. De criterios	Aplicada sobre	Tipo de evaluación	Estrategia de sistematización	Tipo de resultado
Intercambiadores de calor	Intervalo de coeficiente de transferencia de calor para intercambiadores de calor según su tipo	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de área para intercambiadores de calor	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de longitud para intercambiadores de calor	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
Reactores	Recomendación de nivel para reactores	1	Equipo	Comparar propiedades	Cuantitativa	Recomendación
	Material de construcción de intercambiadores de calor de acuerdo con la naturaleza del fluido	2	Equipo	Comparar propiedades	Cualitativa	Recomendación
Recipientes de procesos (Vessels)	Intervalo general de tiempo de residencia para recipientes de procesos	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de altura para recipientes de procesos	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de diámetro para recipientes de procesos	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Relación longitud/diámetro (L/D) recomendada para recipientes de procesos	1	Equipo	Evalúa una ecuación y compara un valor	Cuantitativa	Recomendación
	Intervalo longitud/diámetro (L/D) recomendada para recipientes de procesos	1	Equipo	Evalúa una ecuación	Cuantitativa	Recomendación
	Intervalo longitud/diámetro (L/D) recomendada para recipientes de procesos	1	Equipo	Evalúa una ecuación	Cuantitativa	Recomendación

Clasificación de las reglas de heurística implementadas (Continuación)

Torres	Intervalo de eficiencia de plato para torres (40)	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Altura mínima para torres	1	Equipo	Evalúa un límite	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo general de altura para torres	1	Equipo	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Intervalo longitud/diámetro (L/D) recomendado para torres	1	Equipo	Evalúa una ecuación	Cuantitativa	Recomendación
Tanques	Espesor de pared respecto al diámetro para tanques de altas presiones	2	Equipo	Evalúa rango y límites y compara propiedades	Cuantitativa	Advertencia
	Selección del tipo de tanque respecto a su capacidad volumétrica	2	Equipo	Evalúa rango y límites y compara propiedades	Cuantitativa y cualitativa	Recomendación
Heurísticas de topología	Configuración horno-intercambiador de calor	1	Equipo y corrientes	Evalúa una conexión	Cualitativa	Recomendación
	Presión de entrada en los recipientes de procesos	1	Equipo y corrientes	Evalúa una propiedad	Cuantitativa	Advertencia
	Topología general de fracción de vapor	1	Corrientes	Evalúa un rango	Cuantitativa	Advertencia
	Fracción de vapor para bombas	1	Equipo	Evalúa una propiedad	Cuantitativa	Advertencia
	Fracción de vapor para compresores	1	Equipo	Evalúa una propiedad	Cuantitativa	Advertencia

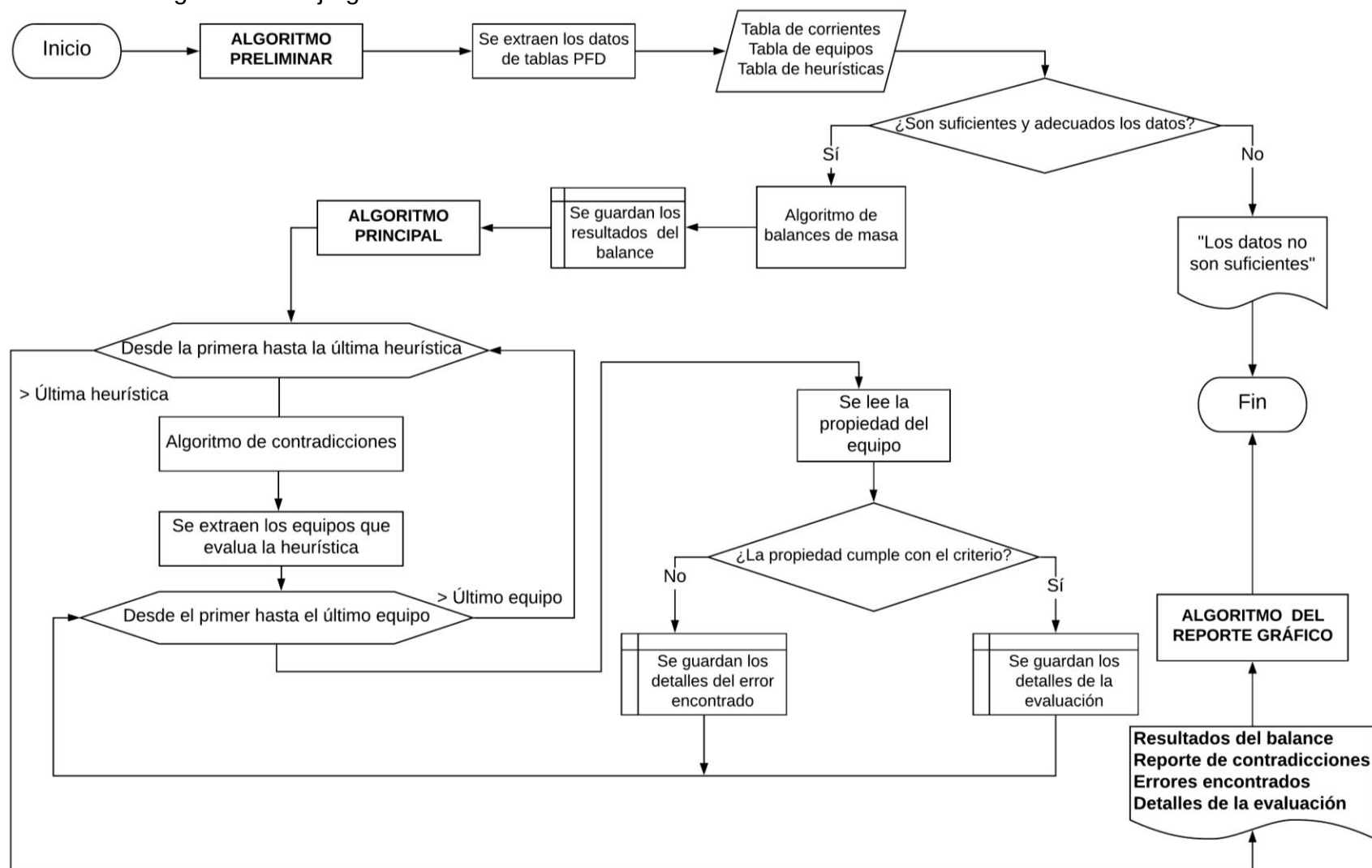
NOTA: Esta es la clasificación en la que se ubican las 274 reglas de heurística implementadas por defecto en el AUDIPRO, en cada fila pueden estar clasificadas más de una regla de heurística según los subtipos de equipo.

ANEXO D. Formato de implementación de reglas de heurísticas

NÚMERO DE HEURÍSTICA	ACTIVA	TÍTULO HEURÍSTICA	RESULTADO	NOMBRE PROPIEDAD 1	LEER/CALCULAR/TEXTO	PROPIEDAD	OPERACIÓN	LEER/CALCULAR/VALOR	CRITERIO 1	MENSAJE ERROR	% TOLERANCIA	Bombas:Centrifuga (Horizontal)	Bombas:Centrifuga (Vertical)	Bombas:Axial	Bombas:Turbina	Bombas:Reciprocante	Bombas:Rotatoria	Bombas:Desplazamiento positivo	Bombas:centrifuga
1	SI	Topología hornos e intercambiadores	RECOMENDACION	TOPOLOGIA	TEXTO	intercambiador	instr	LEER	Equipo:Equipo:Anterior	Error topológico: Se recomienda conectar un &VALOR1& antes de un horno	1								
2	SI	Flujo volumétrico en bombas centrifugas (horizontales)	ADVERTENCIA	FLUJO VOLUMETRICO	LEER	Equipo:Flujo volumetrico	entre	VALOR	1 a 20000 [gpm]	El flujo volumetrico (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1	x							x
3	SI	Flujo volumétrico en bombas centrifugas (verticales)	ADVERTENCIA	FLUJO VOLUMETRICO	LEER	Equipo:Flujo volumetrico	entre	VALOR	5 a 80000 [gpm]	El flujo volumetrico (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1		x						
4	SI	Flujo volumétrico en bombas axiales	ADVERTENCIA	FLUJO VOLUMETRICO	LEER	Equipo:Flujo volumetrico	entre	VALOR	20 a 100000 [gpm]	El flujo volumetrico (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1			x					
5	SI	Flujo volumétrico en bombas tipo turbina	ADVERTENCIA	FLUJO VOLUMETRICO	LEER	Equipo:Flujo volumetrico	entre	VALOR	1 a 2000 [gpm]	El flujo volumetrico (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1				x				
6	SI	Flujo volumétrico en bombas reciprocantes	ADVERTENCIA	FLUJO VOLUMETRICO	LEER	Equipo:Flujo volumetrico	entre	VALOR	0 a 10000 [gpm]	El flujo volumetrico (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1					x			
7	SI	Flujo volumétrico en bombas rotatorias	ADVERTENCIA	FLUJO VOLUMETRICO	LEER	Equipo:Flujo volumetrico	entre	VALOR	1 a 5000 [gpm]	El flujo volumetrico (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1						x		
8	SI	Cabeza en bombas centrifugas (horizontales)	ADVERTENCIA	CABEZA	LEER	Equipo:Cabeza	<=	VALOR	5495 [ft]	La cabeza (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1	x						x	
9	SI	Cabeza en bombas centrifugas (verticales)	ADVERTENCIA	CABEZA	LEER	Equipo:Cabeza	<=	VALOR	6004 [ft]	La cabeza (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1		x						
10	SI	Cabeza en bombas axiales	ADVERTENCIA	CABEZA	LEER	Equipo:Cabeza	<=	VALOR	39 [ft]	La cabeza (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1			x					
11	SI	Cabeza en bombas tipo turbina	ADVERTENCIA	CABEZA	LEER	Equipo:Cabeza	<=	VALOR	2493 [ft]	La cabeza (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1				x				
12	SI	Cabeza en bombas reciprocantes	ADVERTENCIA	CABEZA	LEER	Equipo:Cabeza	<=	VALOR	17000 [ft]	La cabeza (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1					x			
13	SI	Cabeza en bombas rotatorias	ADVERTENCIA	CABEZA	LEER	Equipo:Cabeza	<=	VALOR	11155 [ft]	La cabeza (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1						x		
14	SI	Presión en bombas centrifugas (horizontales)	ADVERTENCIA	PRESION	LEER	Equipo:Presion	<=	VALOR	10000 [psi]	La presion (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1	x						x	
15	SI	Presión en bombas centrifugas (verticales)	ADVERTENCIA	PRESION	LEER	Equipo:Presion	<=	VALOR	2000 [psi]	La presion (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1		x						
16	SI	Presión en bombas axiales	ADVERTENCIA	PRESION	LEER	Equipo:Presion	<=	VALOR	150 [psi]	La presion (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1			x					
17	SI	Presión en bombas tipo turbina	ADVERTENCIA	PRESION	LEER	Equipo:Presion	<=	VALOR	2500 [psi]	La presion (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1				x				
18	SI	Presión en bombas reciprocantes	ADVERTENCIA	PRESION	LEER	Equipo:Presion	<=	VALOR	50000 [psi]	La presion (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1					x			
19	SI	Presión en bombas rotatorias	ADVERTENCIA	PRESION	LEER	Equipo:Presion	<=	VALOR	3000 [psi]	La presion (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1						x		
20	SI	Temperatura en bombas centrifugas (horizontales)	ADVERTENCIA	TEMPERATURA	LEER	Equipo:Temperatura	<=	VALOR	1004 [°F]	La temperatura (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1	x						x	
21	SI	Temperatura en bombas centrifugas (verticales)	ADVERTENCIA	TEMPERATURA	LEER	Equipo:Temperatura	<=	VALOR	500 [°F]	La temperatura (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1		x						
22	SI	Temperatura en bombas axiales	ADVERTENCIA	TEMPERATURA	LEER	Equipo:Temperatura	<=	VALOR	149 [°F]	La temperatura (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1			x					
23	SI	Temperatura en bombas tipo turbina	ADVERTENCIA	TEMPERATURA	LEER	Equipo:Temperatura	<=	VALOR	249 [°F]	La temperatura (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1				x				
24	SI	Temperatura en bombas reciprocantes	ADVERTENCIA	TEMPERATURA	LEER	Equipo:Temperatura	<=	VALOR	572 [°F]	La temperatura (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1					x			
25	SI	Temperatura en bombas rotatorias	ADVERTENCIA	TEMPERATURA	LEER	Equipo:Temperatura	<=	VALOR	653 [°F]	La temperatura (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1						x		
26	SI	Eficiencia en bombas centrifugas (horizontales)	ADVERTENCIA	EFICIENCIA	LEER	Equipo:Eficiencia	entre	VALOR	20 a 90 [%]	La eficiencia (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1	x							x
27	SI	Eficiencia en bombas centrifugas (verticales)	ADVERTENCIA	EFICIENCIA	LEER	Equipo:Eficiencia	entre	VALOR	10 a 90 [%]	La eficiencia (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1		x						
28	SI	Eficiencia en bombas axiales	ADVERTENCIA	EFICIENCIA	LEER	Equipo:Eficiencia	entre	VALOR	65 a 85 [%]	La eficiencia (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1			x					
29	SI	Eficiencia en bombas tipo turbina	ADVERTENCIA	EFICIENCIA	LEER	Equipo:Eficiencia	entre	VALOR	55 a 85 [%]	La eficiencia (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1				x				
30	SI	Eficiencia en bombas reciprocantes	ADVERTENCIA	EFICIENCIA	LEER	Equipo:Eficiencia	entre	VALOR	20 a 85 [%]	La eficiencia (&VALOR1&) esta fuera del rango permitido &VALOR2&	1					x			

Esta tabla se puede apreciar mejor en el archivo de Excel que se encuentra dentro de la carpeta “ANEXO D” en el CD anexo a este documento (**Ver anexo D adjunto en el CD de anexos y puede visualizarse en la Base de Datos de la Biblioteca UIS**).

ANEXO E. Diagrama de flujo general de AUDIPRO



(Ver anexo F y G adjunto en el CD de anexos y puede visualizarse en la Base de Datos de la Biblioteca UIS).

ANEXO F. Manual del usuario para el uso de AUDIPRO

El manual del usuario se encuentra en el CD que contiene el software AUDIPRO, en un archivo en formato PDF que se llama “Manual del usuario AUDIPRO”.

ANEXO G. Evidencia de la evaluación de los casos de estudio

Las evidencias de los casos de estudio se encuentran en la carpeta “ANEXO G” del CD de anexos, anexo a este documento, dicha carpeta contiene un archivo para cada proceso evaluado en la validación interna de AUDIPRO.

ANEXO H. Encuesta aplicada a los estudiantes

Esta encuesta se puede observar en el siguiente enlace web:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSevimWHRhcDEm_qb3O4pyOemg_C1hek6k8wCSzCUAsrWYjjJw/viewform?c=0&w=1

Encuesta de opinión sobre la herramienta AudiPro

En esta encuesta usted opinará sobre los aspectos generales del uso de la herramienta AudiPro. Agradecemos su participación.

*Obligatorio

¿Reconoce la necesidad de que exista una herramienta que revise diseños de procesos confrontándolos con reglas de heurística?

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ Tal vez

¿Cómo considera el desempeño de la herramienta? *

	Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Facilidad de uso	☐	☐	☐	☐	☐
Versatilidad	☐	☐	☐	☐	☐
Velocidad de cálculo	☐	☐	☐	☐	☐
Precisión y exactitud	☐	☐	☐	☐	☐

¿Considera adecuado el menú principal de la herramienta? *

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ Parcialmente

¿Considera que esta herramienta evalúa las variables más pertinentes en el diseño de un proceso? *

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ Parcialmente

¿Los formatos de las tablas de equipos y de corrientes son de fácil comprensión? *

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ Parcialmente

¿Qué tan fácil fue diligenciar la información solicitada en los formatos de las tablas de corrientes y equipos?

- ☐ Muy fácil
- ☐ Fácil
- ☐ Medianamente fácil

☐ Difícil

☐ Muy difícil

¿Cómo considera los resultados generados? *

	Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Muy Bueno
Claridad	☐	☐	☐	☐	☐
Visualización	☐	☐	☐	☐	☐
Cantidad de resultados	☐	☐	☐	☐	☐
Orden	☐	☐	☐	☐	☐

¿Qué dificultades encontró al usar la herramienta? *

☐ Demora en el tiempo de cálculo

☐ Poca amigabilidad de la herramienta

☐ No se encuentra el equipo a revisar

☐ No reporta el origen de las fallas cuando el programa presenta errores

☐ No se encuentran las características de los equipos a revisar

☐ No encontré ninguna dificultad

☐ Otro: _____

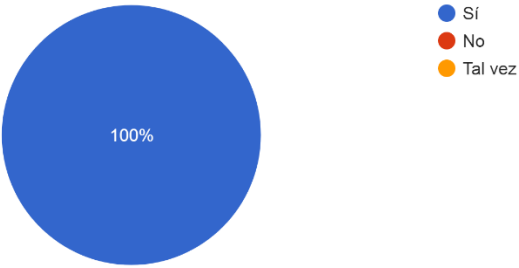
¿Qué tan útil considera que sería la herramienta AudiPro en las asignaturas de diseño del programa de ingeniería química? *

- ☐ Muy útil
- ☐ Medianamente útil
- ☐ Poco útil
- ☐ Nada útil

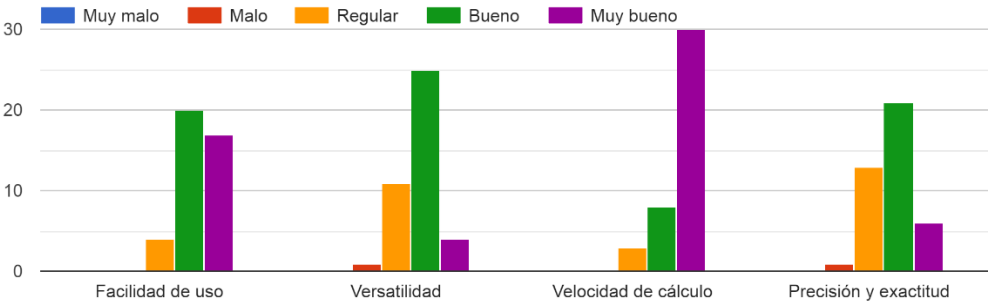
ANEXO I. Resultados generales de la encuesta

¿Reconoce la necesidad de que exista una herramienta que revise diseños de procesos confrontándolos con reglas de heurística?

41 respuestas

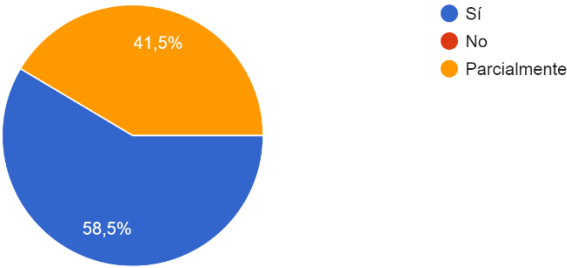


¿Cómo considera el desempeño de la herramienta?



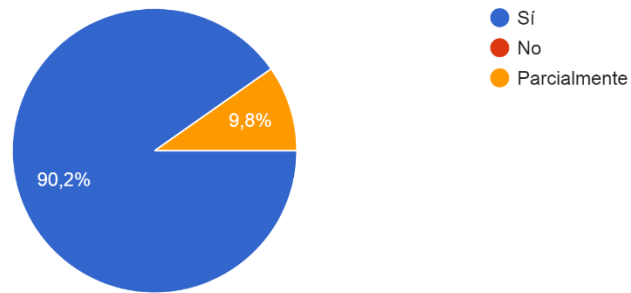
¿Considera adecuado el menú principal de la herramienta?

41 respuestas



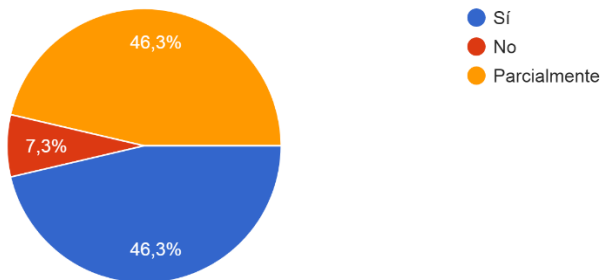
¿Considera que esta herramienta evalúa las variables más pertinentes en el diseño de un proceso?

41 respuestas



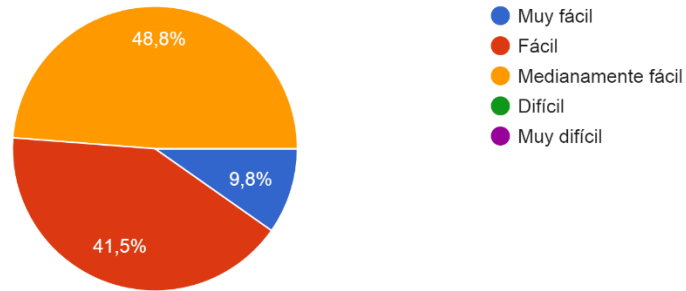
¿Los formatos de las tablas de equipos y de corrientes son de fácil comprensión?

41 respuestas

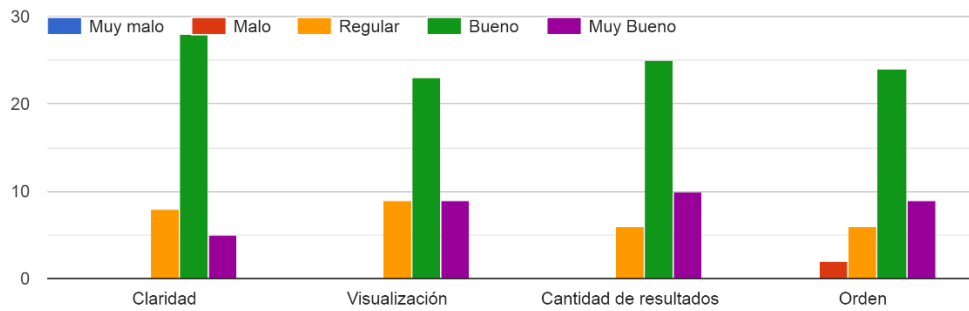


¿Qué tan fácil fue diligenciar la información solicitada en los formatos de las tablas de corrientes y equipos?

41 respuestas

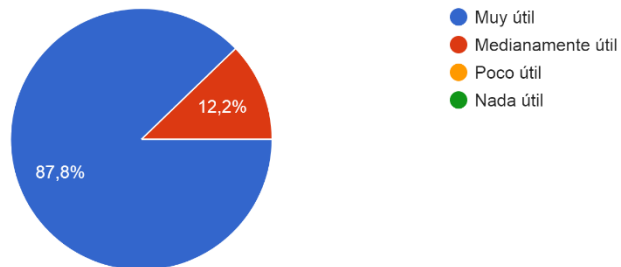


¿Cómo considera los resultados generados?



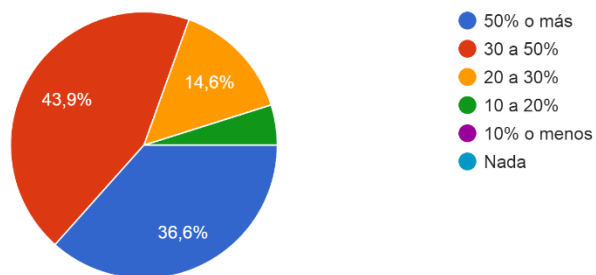
¿Qué tan útil considera que sería la herramienta AudiPro en las asignaturas de diseño del programa de ingeniería química?

41 respuestas



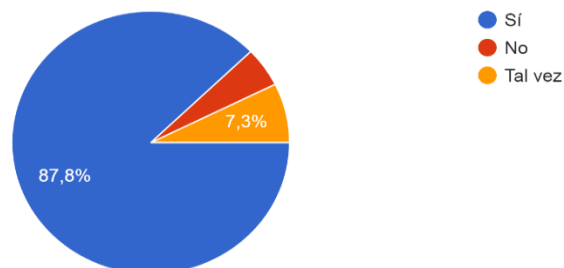
¿Qué porcentaje de tiempo considera que se ahorraría, si usara la herramienta para obtener un BUEN diseño de un proceso?

41 respuestas



En su vida laboral, ¿usaría la herramienta para encontrar errores en el diseño de un proceso o equipo?

41 respuestas



ANEXO J. Acciones correctivas

Reporte de errores y acciones correctivas de la evaluación interna

Error	Descripción	Acción correctiva	Solucionado
Inconsistencia con las unidades dimensionales	Dificultades al definir las unidades de las propiedades en las tablas PFD de equipos y corrientes	Se crearon listas desplegables con las unidades disponibles para cada propiedad	Sí
Inconsistencia de lectura de propiedades	Error al leer propiedades textuales consignadas en letra minúscula	Se programó un algoritmo que transforma cualquier propiedad textual a letras mayúsculas	Sí
Inconsistencia del separador decimal	Ambigüedad en la interpretación de los caracteres punto (.) y coma (,)	Se programó un algoritmo que elige por defecto el punto (.) como separador decimal	Sí
Error al leer espacios en blanco	Presencia de error en la lectura de propiedades textuales o numéricas con espacios en blanco	Modificación del comando LEER para eliminar caracteres vacíos en los valores traídos de las tablas	Sí
Inconsistencia con propiedades faltantes	Error al leer propiedades faltantes al evaluar una regla de heurística	Modificación del comando LEER para que no se detenga si hay propiedades faltantes, en caso de ocurrir el programa evalúa otro equipo u otra regla de heurística	Sí
Error de carga de archivos	Fallas al cargar los archivos que contienen las tablas PFD del proceso a evaluar	Se reprogramó el algoritmo de carga de archivos y se modificó el menú	Sí
Error en los balances de masa	Inconsistencias al calcular el porcentaje de error en los balances de masa del proceso	Se corrigió la manera de calcular el porcentaje de error del balance general y por componentes	Sí

Reporte de errores y acciones correctivas de la evaluación interna (Continuación)

Error	Descripción	Acción correctiva	Solucionado
Error en la estrategia de evaluación de regla de heurísticas	Dificultades al evaluar la misma regla de heurística sobre los mismos equipos. Las lecturas de propiedades de manera individual dificultaban y ralentizaba la verificación del cumplimiento de las reglas de heurística.	Ahora las propiedades se extraen de manera conjunta en un vector que contiene en cada posición la propiedad de cada equipo a evaluar con la heurística	Sí
Error en los factores de conversión de unidades	Confusión en la selección y restauración de los factores de conversión de las unidades. Se aplicaban factores no compatibles con las unidades que se estaban ajustando.	Ahora se reinicia el factor de conversión automáticamente antes de evaluar la siguiente regla de heurística	Sí
Fallas en el compilador de ecuaciones	Error en la interpretación de los elementos de las ecuaciones, ya que no se clasificaban correctamente los caracteres de la ecuación	Se programó un proceso que clasifica todos los caracteres presentes en una ecuación y los categoriza en operadores, valores, variables y símbolos	Sí
Error en heurísticas de dos criterios	Fallas en el momento de evaluar las propiedades en la verificación del segundo criterio de las reglas de heurística de múltiples criterios	Ahora, el programa evalúa el primer y segundo criterio de cada equipo individualmente, de manera que siempre se va a evaluar la propiedad correspondiente para cada equipo, tanto para el primer criterio como para el segundo	Sí
Exceso de cifras decimales	Cantidad variable de cifras decimales en los valores consignados en el reporte	Se programó el formato numérico de presentación por defecto, estableciendo un número fijo de cifras decimales en el reporte	Sí

Reporte de errores y acciones correctivas de la evaluación interna (Continuación)

Error	Descripción	Acción correctiva	Solucionado
Reglas de heurística no evaluadas	Se reportaban reglas de heurística no activadas como si se hubiesen evaluado	Se corrigió el algoritmo de evaluación de reglas de heurística para que no evalúe heurísticas no activas	Sí
Errores en el reporte de generalidades	El reporte de generalidades presentaba varios errores de orden y presentación	Se cambió el formato de reporte de generalidades por uno más ordenado. Estas generalidades ahora se observan en una lista organizada por secciones en una tabla	Sí
Superposición en las etiquetas de los datos en las gráficas	Las etiquetas textuales y numéricas de las gráficas se posicionaban encima de las gráficas	No se implementó una solución para este problema	No

Reporte de errores y acciones correctivas de la primera sesión de la evaluación externa

Error	Descripción	Acción correctiva	Solucionado
Inconsistencias en el escalado de las gráficas	Si los valores de las gráficas del reporte son muy pequeñas respecto a los límites impuestos por las reglas de heurística, no es posible observar la barra que representa el valor de la propiedad en la gráfica	Se modificó el algoritmo generador de gráficas para que haga zoom sobre los valores de las propiedades de los equipos representados en las barras de la gráfica	Sí
Error al cargar tablas PFD	El programa presenta errores al cargar tablas que hayan sido diligenciadas con hipervínculos a otras hojas o libros de Excel	Se programó un algoritmo que extrae los datos directamente de las tablas PFD del proceso y elimina los hipervínculos	Sí
Errores en el reporte detallado por tipo de equipo	Se cruzaba información correspondiente a otros equipos (p. ej., información de los errores de bombas aparecían en la sección de compresores)	El algoritmo se corrigió para que antes de empezar una nueva sección del reporte detallado, el programa revise que todos los vectores y matrices usados para graficas estén vacíos	Sí
Bloqueo del programa	Se evidenció bloqueo de la herramienta en algunos computadores al hacer cambios de ventanas	Se ordenó cada sección del algoritmo y se eliminaron líneas de programación sobrantes	Sí
Menú principal poco llamativa	Tras la evaluación interna de la primera sesión los estudiantes consideraron que debería mejorarse en aspecto de visualización	Modificar el menú por uno más atractivo visualmente	Sí

Reporte de errores y acciones correctivas de la segunda sesión de la evaluación externa

Error	Descripción	Acción correctiva	Solucionado
Errores en la ejecución de la interfaz	Al manipular las opciones de la interfaz desaparecen algunos botones y otros elementos como listas desplegables	Se bloquearon los elementos de la interfaz para que no cambiaran de tamaño ni desaparecieran	Sí
Errores en etiquetas de texto	Errores en las etiquetas de texto de algunos elementos mostrados en el reporte de las generalidades	Se corrigieron las etiquetas de texto que presentaban falencias	Sí
Inconsistencias en el reporte de errores por propiedad	Aparecen propiedades que ni siquiera fueron evaluadas por alguna regla de heurística	El algoritmo se corrigió para que antes de empezar una nueva sección del reporte detallado, el programa revise que todos los vectores y matrices usados para graficas estén vacíos	Sí
Error de ejecución	En algunas ocasiones, al ejecutar el programa se produce el error "1004 en tiempo de ejecución"	Se ordenó cada sección del algoritmo y se eliminaron líneas de programación sobrantes	Sí

Evidencia de algunas acciones correctivas

Inconsistencias con las unidades dimensionales

Dificultades al definir las unidades de las propiedades en las tablas PFD de equipos y corrientes.

COMPRESORES	Sigla	Unidades
Tipo	-	
Flujo volumétrico	Fv	m ³ /h
Temperatura	T	°C
Presión de descarga	P	bar
Relación de compresión	Rc	
Eficiencia	E	%
Potencia	W	kW
Tipo driver (impulsor)	-	
Naturaleza del fluido	-	
Material de Construcción	-	

Formato de tablas PFD sin listas de unidades

COMPRESORES	Sigla	Unidades
Tipo	-	
Flujo volumétrico	Fv	m ³ /h
Temperatura	T	m ³ /s m ³ /h
Presión de descarga	P	m ³ /dia ft ³ /s
Relación de compresión	Rc	ft ³ /min ft ³ /h
Eficiencia	E	gpm bbl/dia
Potencia	W	kW
Tipo driver (impulsor)	-	
Naturaleza del fluido	-	
Material de Construcción	-	

Formato de tablas PFD con listas desplegables de unidades

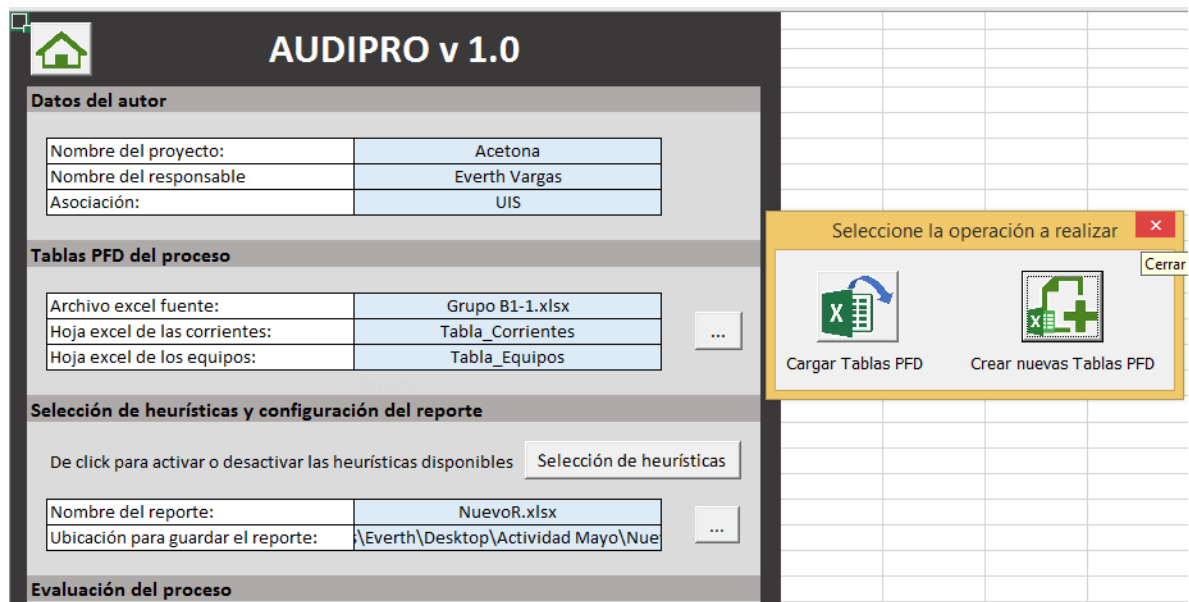
Error de carga de archivo de tablas PFD

Fallas al cargar los archivos que contienen las tablas PFD del proceso a evaluar.

Auditor de procesos	
Hoja con las condiciones de las corrientes de proceso	TablaCorrientes
Hoja con las condiciones de los equipos de proceso	TablaEquipos
Hoja donde se hará el reporte	Reporte
Hoja donde se hará el reporte del balance de masa	ReporteBalance
Auditar Proceso	

Menú anterior con fallas

Se programó un algoritmo que extrae los datos directamente de las tablas PFD del proceso y elimina los hipervínculos.



AUDIPRO v 1.0

Datos del autor

Nombre del proyecto:	Acetona
Nombre del responsable	Everth Vargas
Asociación:	UIS

Tablas PFD del proceso

Archivo excel fuente:	Grupo B1-1.xlsx	...
Hoja excel de las corrientes:	Tabla_Corrientes	
Hoja excel de los equipos:	Tabla_Equipos	

Selección de heurísticas y configuración del reporte

De click para activar o desactivar las heurísticas disponibles **Selección de heurísticas**

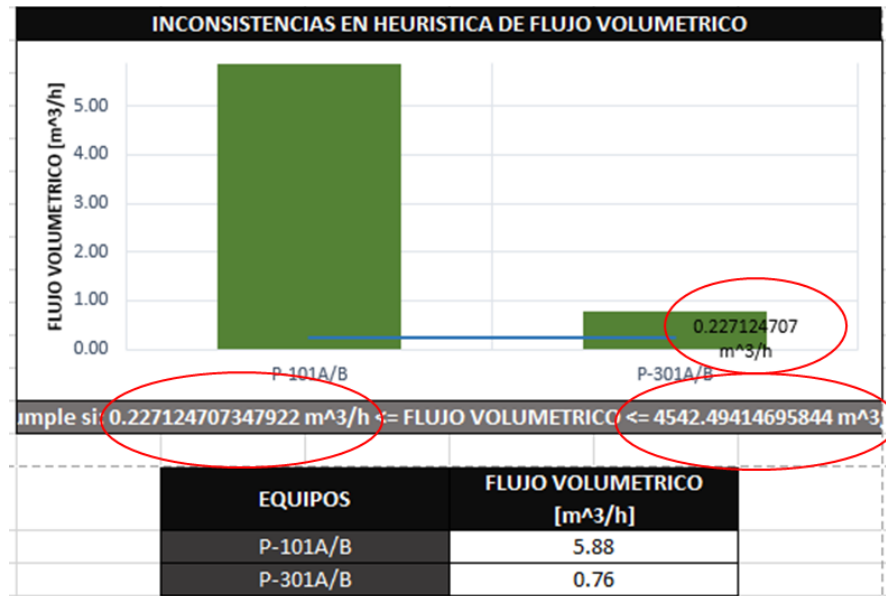
Nombre del reporte:	NuevoR.xlsx	...
Ubicación para guardar el reporte:	\Everth\Desktop\Actividad Mayo\Nue	

Evaluación del proceso

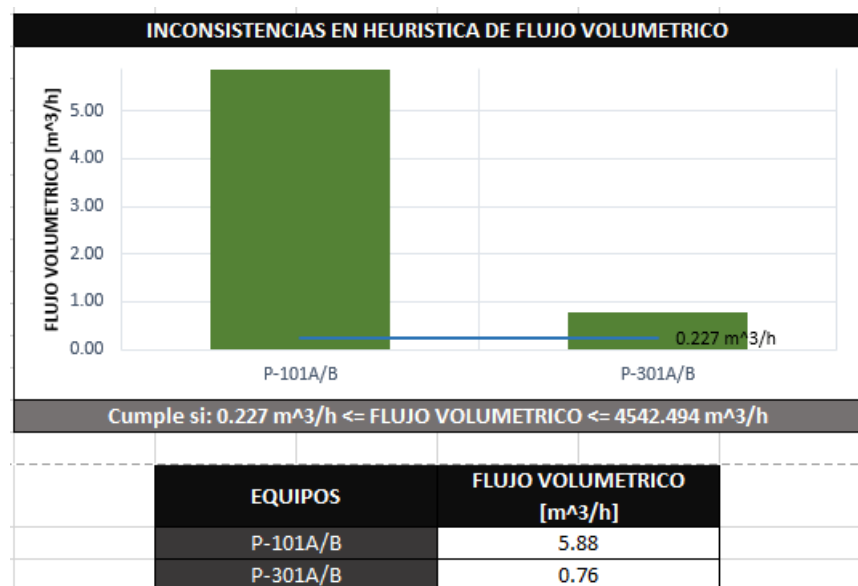
Nuevo menú sin problemas de carga de archivos

Exceso de cifras decimales

Se corrigió la variabilidad y el exceso de cifras decimales en los valores consignados en el reporte.



Gráfica generada con exceso de cifras decimales



Gráfica corregida generada con cifras decimales adecuadas

Errores en el reporte de generalidades

El reporte de generalidades presentaba varios errores de orden y presentación.

CORRIENTES SIN CONEXION ALGUNA A UN EQUIPO EN LAS TABLAS DEL PFD		
R_LIQ_NEUTRA		
R_SOLIDO		
S1		
S2		
S3		
S4		
S5		
SAL_REACT_A		
SAL_REACT_B		
XYLITOL		
CORRIENTES QUE SE ALIMENTAN AL PROCESO		
CO2_CRIT		
ENZIMA		
ENZIMA.		
H2O		
H2O.		
H2SO4		
N2H8SO4		
NaOH		
NH3		
R_SOLID_INOC		
SOLIDO_ENT		
SOLIDO_TOTAL		
VAPOR_ALT_P		
CORRIENTES QUE SON PRODUCTO Y/O RESIDUO DEL PROCESO		
ACETONE		
BUTANOL		

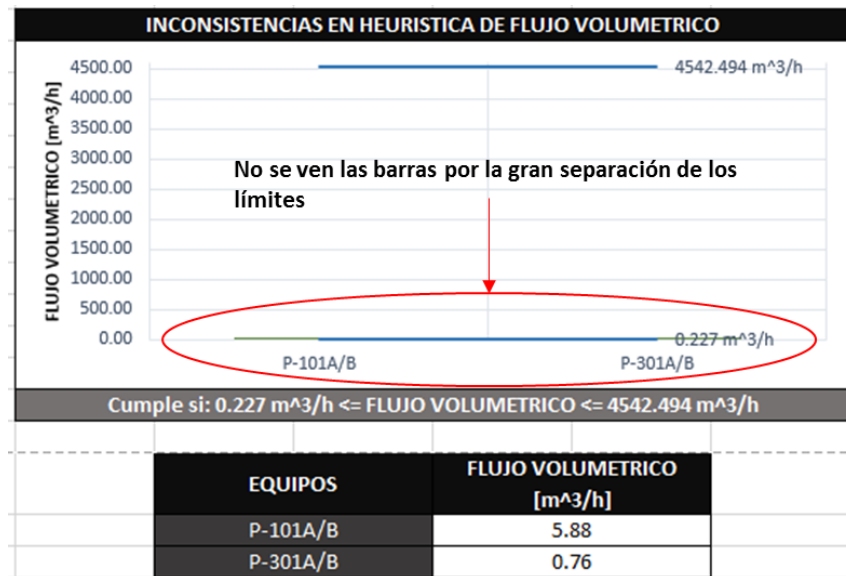
Antiguo reporte de generalidades

REPORTE DE GENERALIDADES	
Nombre del proyecto:	Acetona
Nombre del responsable:	Everth Vargas
Asociación:	UIS
Fecha de generación del reporte:	02/07/2019 2:47
GENERALIDADES E INCONSISTENCIAS EN LOS DATOS DE ENTRADA	
CORRIENTES	
Corrientes cuya suma de composiciones no es igual	-Ninguno-
Corrientes repetidas en la tabla	-Ninguno-
Corrientes no conectadas a equipos	-Ninguno-
Corrientes que se alimentan al proceso	28, 34, 35, 36, 38, 40
Corrientes que son productos o residuos del	27, 29, 37, 39, 41
EQUIPOS	
Equipos sin corrientes de entrada	TK-101
Equipos sin corrientes de salida	TK-302, TK-303/TK-304, TK-301
Equipos no definidos en la tabla de equipos	R-201A/B, VLV-301, MIX-301, VLV-302, TK-303/TK-304, E-305, VLV-303
Equipos no definidos en la tabla de corrientes	R-201, TK-303, TK-304
Equipos con tipo de equipo no válido	H-201, TK-101, TK-301, TK-302, TK-303, TK-304

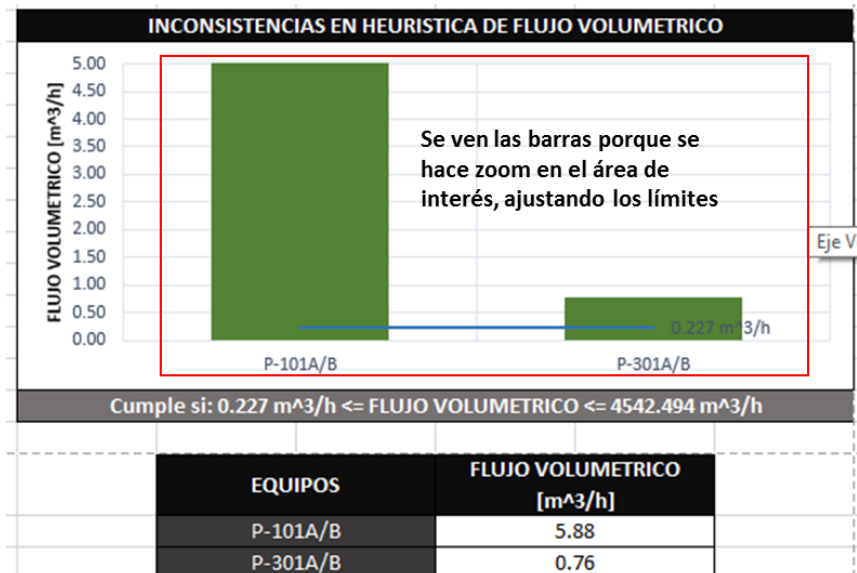
Nuevo reporte de generalidades (organizado y con mejor presentación)

Inconsistencias en el escalado de las gráficas

Si los valores de las gráficas del reporte son muy pequeñas respecto a los límites impuestos por las reglas de heurística, no es posible observar la barra que representa el valor de la propiedad en la gráfica.



Antiguas gráficas con inconsistencias en escalado



Nuevas gráficas con zoom sobre el área de interés

Menú principal poco llamativo

Tras la evaluación interna de la primera sesión los estudiantes consideraron que debería mejorarse el aspecto visual del menú principal.

Auditor de procesos	
Hoja con las condiciones de las corrientes de proceso	TablaCorrientes
Hoja con las condiciones de los equipos de proceso	TablaEquipos
Hoja donde se hará el reporte	Reporte
Hoja donde se hará el reporte del balance de masa	ReporteBalance
Auditar Proceso	

Anterior menú principal

#LaUISqueQueremos

Escuela de ingeniería química

Universidad Industrial de Santander

70 años

AUDIPRO

Herramienta para la auditoría de diseño de procesos químicos

Elaborado por:
Everth Alfonso Vargas Rubio

Dirigido por:
PhD. Fredy Augusto Avellaneda
PhD. Débora Alcida Nabarlatz
Ing. Iván Darío Ordóñez

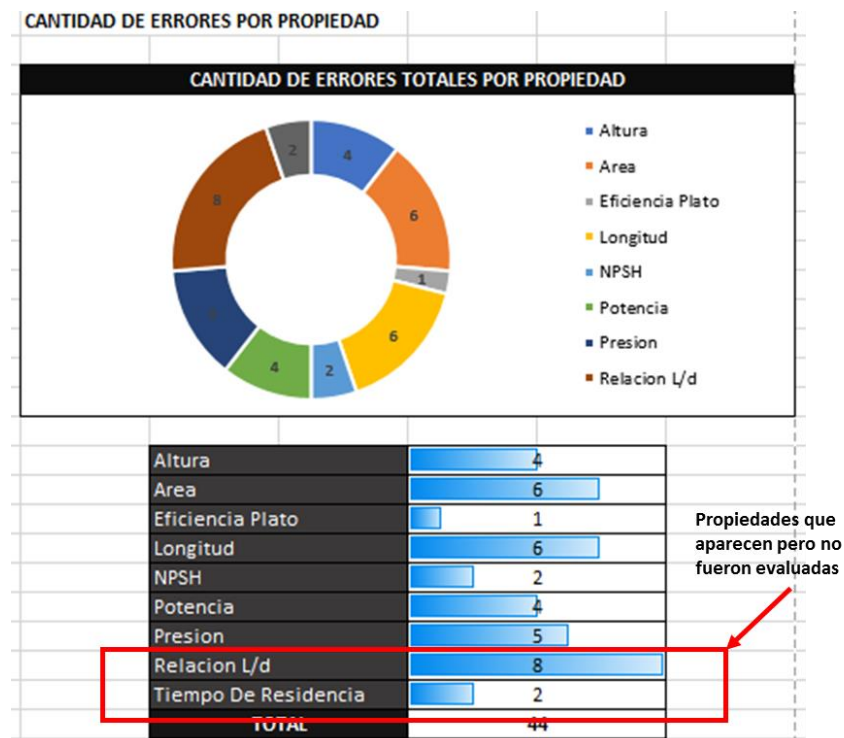
Menú principal

Otras opciones

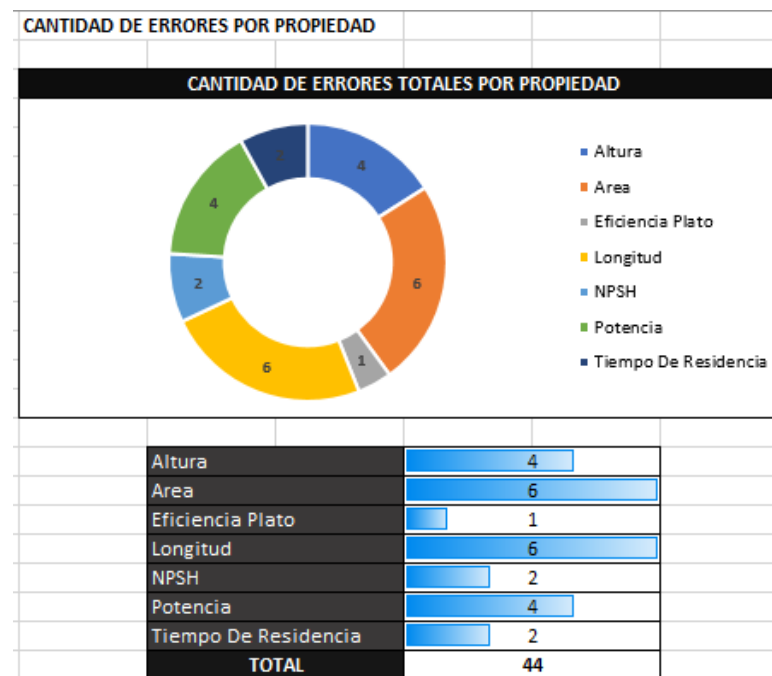
Nuevo menú principal

Inconsistencias en el reporte de errores por propiedad

Aparecían propiedades que ni siquiera fueron evaluadas por alguna regla de heurística.



Antigua gráfica de propiedades donde aparecían propiedades no evaluadas



Nueva gráfica que muestra solo las propiedades no evaluadas