

Facultad de Ingeniería Industrial y Turismo
Departamento de Ingeniería Industrial

**Evaluación de alternativas para
el funcionamiento de la planta
de Lixiviación de la fábrica
Pedro Sotto Alba durante la
reparación del cabezal
distribuidor de pulpa a los
precalentadores**

Autora: Odalmis García Matos

Tutor: Ing. Pedro Andrés Díaz Leyva

Ing. Alain Borges Reyes

Consultante: Ing. Ariel Mosqueda Martínez

Holguín, 2016



*Considero más valiente al que conquista sus deseos
que al que conquista a sus enemigos, ya que la
victoria más dura es la victoria sobre uno mismo.*

Aristóteles.

Dedicatoria

*Ante todo a Dios por darme fuerzas y ser mi ayuda en
momentos de flaqueza.*

*A mi mami, por tu dedicación y estar siempre pendiente de
mí*

*A mi papi (daddy), por tu apoyo incondicional y por creer
en mí*

A mi hermano, por ser como eres...

Los quiero mucho

Agradecimientos

A Dios por permitirme escalar un peldaño más en mi vida.

A mis padres por ser mis guía, por su sacrificio estos cinco años para que no me faltara nada, por estar ahí siempre para mí, porque hoy soy quien soy gracias a ellos, en especial a mi papá por ser mi máximo tutor en esta investigación porque sin sus ideas y ayuda esta tesis no hubiese sido posible, por tanto, este logro también es tuyo pá, sepan que estaré eternamente agradecida y ojalá que algún día pueda retribuir todo eso.

A mi hermano porque siempre me ayudó en todo lo que pudo.

A mi familia por creer en mí.

A mi pichón por todo su cariño y apoyo a pesar de la distancia, Buzo.

A mi tutor Pedro por todo su esfuerzo y dedicación. Gracias por confiar en mí

A mis queridos amigos: Yuma (bicho raro), Dayana (nanana), Anielis (yelis), William(mi piolín), Fabián (fabi), Gema (mi bruja pelúa), Kati (katusquita), Dianel (dianelcillo), quienes considero y consideraré siempre mi familia también, por los malos y buenos momentos que pasamos juntos y porque sin saber, pusieron luz y alegría en mis días apagados y tristes en esta etapa universitaria.

A los trabajadores de la fábrica Pedro Sotto Alba en especial a Alain, Ariel, José, Edel, Oney Correa, Leodán y Suraima por su ayuda en todo lo que necesité.

A los amigos del barrio porque me hicieron reír y despejar en mis momentos de estrés.

A todos los que de una manera u otra contribuyeron en mi formación profesional.

A los que alguna vez me han tendido su mano para ayudar.

A los que quieren lo mejor para mí, pese a mis actitudes erróneas e inmaduras.

A todos, MUCHAS GRACIAS

Resumen

En la actualidad es reconocida universalmente la necesidad de aumentar los niveles de bienestar social y por tanto se hace necesaria la mejora continua de la productividad en toda organización, ya que de ello depende ajustarse a los cambios que se producen en el entorno mundial. Por lo anterior, el análisis y evaluación de los procesos productivos adquiere una gran importancia pues nos da la posibilidad de darle solución a problemas existentes de una forma correcta, lógica y sistemática además de realizar mejoras dentro de estas organizaciones. Para ello son utilizadas innumerables herramientas de evaluación de procesos de producción entre las que se encuentra la simulación computacional de procesos, una poderosa herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Es empleada en sectores tales como la agricultura, la salud, la ingeniería, las telecomunicaciones y la minería, en especial, la industria del níquel. En correspondencia con esto se desarrolló la presente investigación que tiene como objetivo evaluar alternativas para el funcionamiento de la planta de Lixiviación de la empresa mixta Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A durante el tiempo de reparación del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores. Para ello se aplicó el procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos propuesto por Aldana Castillo (2016) que permitió evaluar y seleccionar una alternativa para la continuidad del proceso de lixiviación durante la sustitución del cabezal distribuidor que alimenta de pulpa a los precalentadores de dicha planta.

Abstract

Today it is universally recognized the need to increase social welfare levels and therefore requires the continuous improvement of productivity in any organization, since it depends adjust to changes that occur in the global environment. Therefore, the analysis and evaluation of production processes becomes very important because it gives us the ability to provide solutions to existing problems in a correct, logical and systematic way and make improvements within these organizations. For this purpose, they are used countless assessment tools production processes including computational process simulation, a powerful support tool for decision making is. It is used in sectors such as agriculture, health, engineering, telecommunications and mining, especially the nickel industry. In correspondence with this the present research is to evaluate alternatives for the operation of the plant leaching of Pedro Sotillo Alba Mocha Nickel S.A. during the repair time feeding system preheaters pulp was developed. For this, the procedure for the computer simulation of production processes proposed by Aldana Castillo (2016) that allowed evaluate and select an alternative for the continuity of the leaching process during replacement of the distributor head feeding pulp to the preheaters of the plant was applied .

Índice

Introducción	1
Capítulo I: Marco teórico-práctico referencial de la investigación	6
1.1 Procesos productivos. Conceptualización y clasificaciones.	6
1.1.1 Los procesos continuos.....	9
1.2 Herramientas para la evaluación de procesos productivos.	9
1.2.1 Herramientas y Técnicas Cualitativas.....	10
1.2.2 Herramientas y Técnicas Cuantitativas.	12
1.3 Procedimientos para la simulación de procesos asistida por computadoras.....	16
1.3.1 Procedimiento para la simulación asistida por computadoras propuesto por Aldana Castillo (2016).....	19
1.4 El proceso de lixiviación, características y principales indicadores de eficiencia.	21_Toc452573149
1.4.1 Breve descripción del flujo tecnológico del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa Nickel S.A.	24
1.4.2 Situación actual del sistema de pulpa alimentada a los precalentadores de la planta de Lixiviación.....	24
Capítulo II: Aplicación del procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos en la empresa mixta Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A.....	27
2.1 Etapa I: Preparación inicial.....	27
2.2 Etapa II: Modelado y experimentación	34
2.3 Etapa III: Control y mejora.....	42
Valoración económica - social.....	44
Conclusiones.....	45
Recomendaciones.....	46
Bibliografía.....	47
ANEXOS	53

Introducción

En la actualidad, se ha llegado a la conclusión de que la minería nace y progresa a causa de la necesidad de materiales adecuados para el desarrollo de cada civilización. Por ello, no es de extrañar que los primeros vestigios mineros se encuentren en todo el Paleolítico (Edad de la Piedra Antigua), y en el tránsito de esta al Neolítico (Edad de la Piedra Pulimentada) aparecieron en Europa multitud de manifestaciones de minería: en Francia, Alemania, Suiza, Bélgica, Holanda, Dinamarca, Polonia y España. (Armengot, 2012)

Desde entonces y hasta nuestros días, la minería no ha dejado de desarrollarse de una manera continua, existiendo grandes industrias internacionalmente, dedicadas a la excavación y explotación de diferentes yacimientos minerales como el oro, cobre, hierro, petróleo, níquel, etc., convirtiéndose en un sector de suma importancia para la economía de cualquier país.

Los minerales poseen un incalculable uso en la vida humana, ya sea en joyerías, la siderurgia, industrias, etc., y esto está dado principalmente por la dureza, maleabilidad y altas resistencias a la corrosión que poseen muchos de ellos, como es el ejemplo del níquel, un metal brillante plateado-blanco con un ligero matiz dorado y está presente en el interior de la tierra principalmente en su núcleo hallándose en la naturaleza bajo la forma de sulfuro y que por sus múltiples usos es uno de los metales con mayor demanda en el plano internacional. Entre los mayores productores se encuentra: Rusia, Canadá, Bolivia, Colombia, Nueva Caledonia provincia de ultramar de Francia, República Dominicana y Cuba.

La minería en Cuba ha sido una de las actividades productivas que ha respaldado la economía nacional, ya que el país posee uno de los yacimientos niquelíferos más importantes del planeta, el cual representa, aproximadamente, el 37,3 % de la reserva mundial. (Astorga, 2015)

Por tal motivo ha surgido la necesidad de realizar un perfeccionamiento en la industria del níquel que permita llevarla hacia un futuro mejor; por eso y con el objetivo de trazar un camino para transformar, paulatinamente, el modelo económico cubano, y el ánimo de hacerlo más sostenible a largo plazo, se realizó en abril del año 2011, el VI Congreso del Partido Comunista de Cuba (PCC). En lo

concerniente a esta industria, los lineamientos aprobados en el mismo se referían a que las prioridades para su desarrollo debían girar en torno al fomento de las exportaciones, la reducción de los costos, la sustitución de los insumos importados y la continuación del proceso de redimensionamiento. Esto queda plasmado en los lineamientos (215, 218, 219, 224) del Capítulo VIII Política Industrial y Energética. Para explotar los yacimientos níquelíferos existentes en la parte oriental del país se hizo necesario la creación de un sistema de plantas, las cuales quedaron enclavadas en los municipios de Nicaro y Moa en la provincia de Holguín, René Ramos Latour, la que por decisión del estado cubano cerró en el año 2012 puesto que ya no contaban con condiciones tecnológicas favorables para seguir produciendo además de que las concentraciones de mineral en las extracciones era bajo; la Comandante Ernesto Che Guevara perteneciente a la empresa estatal Cuba Níquel y la Pedro Sotillo Alba, quien fue abandonada por los estadounidenses tras el triunfo de la Revolución y en el año 1961 se pone en marcha por iniciativa del Comandante Ernesto Che Guevara, en ese momento Ministro de Industrias de Cuba, contando para ello con la ayuda del ingeniero cubano Demetrio Presilla.

La fábrica Pedro Sotillo Alba se considera única de su tipo en el mundo por su forma de operación, esta cuenta con una planta encargada de separar el níquel más cobalto de otros minerales mediante la tecnología de lixiviación ácida a presión, la cual la convierte en un proceso novedoso. A finales del año 1994 la corporación canadiense Sherrit Inc. se asoció con la Compañía General del Níquel de Cuba constituyendo una de las asociaciones más importantes en el territorio nacional, ya que involucra un monto de capital de 500 millones de dólares, a invertir a plazos, una concesión minera por 25 años y otra concesión similar por 25 años más. A la par, la asociación ha dado lugar a una de las mayores corporaciones productoras de níquel en el mundo. Al formar la empresa mixta, la Sherrit Inc. y la Compañía General del Níquel de Cuba comparten al 50 por ciento la propiedad de tres importantes empresas: la planta Pedro Sotillo Alba, nombrada ahora Moa Nickel S.A. que produce el sulfuro de níquel más cobalto; la Cobalt Refinery Company Inc. (COREFCO), de Fort Saskatchewan, península de Alberta,

Canadá encargada de refinar ambos metales, y la International Cobalt Company Inc. (INTERCO) con sede en Bahamas, que comercializa el producto final.

Hoy en día esta sociedad mixta con el objetivo de implementar una política de sustitución de importaciones con preponderancia al fomento de este sector minero metalúrgico, se encuentra en plena construcción de una nueva planta industrial para la obtención de ácido sulfúrico, que reportará mayor eficiencia a los procesos productivos de la empresa. El referido compuesto químico se emplea fundamentalmente en esa fábrica para extraer las porciones de níquel y cobalto contenidas en el mineral, por lo que su disponibilidad en áreas de la propia industria y en adecuadas cuantías, significará un resorte para la productividad y un ahorro sustancial a la economía nacional.

La edificación del proyecto, que al ser concluido producirá más de mil toneladas por jornada, posee un alto costo, y corre a cargo de obreros y técnicos pertenecientes a varias empresas, entre estas, la Constructora y Reparadora del grupo empresarial Cubaníquel, Mantenimiento a Centrales Eléctricas (EMCE), la ECI-3 y la ECOI-9, a su vez, liderados por especialistas de Dinvai Construcciones, del Ministerio de la Construcción. (Hechavarría, 2015)

A pesar de que se encuentran enfrascados en nuevos proyectos que permitirá sustituir importaciones y así incrementar su eficiencia, en la planta de Lixiviación de dicha empresa están existiendo problemas técnicos-operacionales que ponen en peligro el flujo tecnológico de toda la fábrica.

A partir de entrevistas con operarios y jefes de turno de la planta, así como la observación directa y el análisis del proceso se determinó que el deterioro del cabezal distribuidor que alimenta a los precalentadores de la pulpa, procedente de la planta de Espesadores de pulpa, debido al tiempo prolongado en operaciones y la abrasividad que provoca la arena que trae el mineral, es un problema que urge resolver cuanto antes ya que puede provocar un paro en el proceso y con ello grandes pérdidas a la empresa. Para esto la dirección de la planta tiene como alternativa, bajar la capacidad de la misma hasta donde alcance el nivel inferior permisible de los tanques de almacenaje siempre que fuera posible cumplir con el tiempo que se establezca para el cambio de dicho cabezal, siendo así, una vez

cambiado este se restablecería las operaciones normales a igual capacidad que antes del cambio.

Debido a que antes no se había experimentado un cambio de este tipo (en operaciones) no es seguro que se cumpla con el tiempo programado, además de que puede presentarse irregularidades en el montaje (izaje, coordinación del trabajo, herramientas, etc.), en este caso, es inminente la parada de la planta de forma gradual, así como la de las demás plantas de la fábrica que dependen completamente de ella. Al detenerse las plantas, considerando que sean 48 horas, se dejarían de producir 204.934 toneladas de níquel más cobalto (Ni+Co) y al analizar el precio del níquel en el trimestre de enero a marzo del año 2016 que es de aproximadamente 4.5 pesos por libras (USD/Lb) equivalente a 9900 pesos por toneladas (USD/Ton), se obtendrían pérdidas de 2 028 846.60 pesos en USD influyendo negativamente en la empresa y en el país de forma general. Por lo que se hace necesario encontrar una forma de realizar la reparación de la parte dañada del proceso sin tener que detener la planta. Lo anteriormente expuesto constituye la situación problemática existente lo que genera como **problema profesional**: ¿Cómo evaluar alternativas para el funcionamiento de la planta de Lixiviación durante el tiempo de reparación del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores?

El **objeto de estudio** de la investigación se puede definir como la evaluación de flujos productivos.

Se propone como **objetivo general** evaluar alternativas para el funcionamiento de la planta de Lixiviación durante el tiempo de reparación del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores.

El **campo de acción** es evaluación del sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores de la planta de lixiviación.

Para dar cumplimiento al objetivo general se proponen como **objetivos específicos**:

1. Conformar el marco teórico-referencial de la investigación.
2. Aplicar un procedimiento para la simulación de procesos en el sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores de la planta de Lixiviación

Se plantea como **idea a defender** que la aplicación de un procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos en la planta de Lixiviación de Moa Nickel S.A permitirá evaluar el rendimiento de alternativas para el funcionamiento de la planta, sin que sea necesaria la interrupción del proceso, durante la reparación del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores.

En el desarrollo de la investigación se utilizan diferentes **métodos teóricos y empíricos, cuantitativos y cualitativos**, incluyendo técnicas y herramientas asociadas de la Ingeniería Industrial:

Métodos teóricos:

- Histórico - lógico: para estudiar la evolución de los procesos de minería y su relación con el sistema actual de producción cubano.
- Inductivo - deductivo: para diagnosticar el estado actual de la planta de Lixiviación y para la aplicación del procedimiento escogido para la simulación del proceso.
- Sistémico - estructural: en la aplicación del procedimiento para la simulación de procesos asistida por computadoras.
- Analítico - sintético: para desarrollar el análisis de la información obtenida a partir de la revisión de la literatura y la documentación especializada, así como de la experiencia de los especialistas y trabajadores consultados.

Métodos empíricos: observación directa, trabajo en grupo, revisión documental, método Delphi de criterio de expertos.

Para su presentación, esta tesis se estructuró de la forma siguiente: un capítulo 1, en el que se expone el marco teórico-práctico referencial que sustentó la investigación; un capítulo 2 que contiene la aplicación del procedimiento expuesto en el capítulo 1 en la fábrica Pedro Sotto Alba MoaNickel S.A; las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación; la bibliografía consultada y un conjunto de anexos de necesaria inclusión, como complemento de la investigación realizada.

Capítulo I: Marco teórico-práctico referencial de la investigación

Este capítulo se realizó a partir de la revisión y consulta de literatura especializada en el tema a tratar. El mismo permitirá un análisis de los aspectos fundamentales que sirven de soporte para el desarrollo de la presente investigación; precisando conceptos, herramientas para la evaluación de flujos productivos, así como un análisis de procedimientos para la simulación asistida por computadoras con la finalidad de escoger uno y aplicarlo en el proceso de lixiviación ácida a presión de la fábrica Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A. Se concluirá con un análisis de este proceso y su estado actual.

1.1 Procesos productivos. Conceptualización y clasificaciones.

Los procesos han existido siempre, forman parte de toda organización y constituyen lo que se hace y como se hace. El funcionamiento de los procesos que, por sus características, cruzan los límites funcionales repetidamente, fuerzan a la cooperación y obligan a una cultura de empresa, más abierta, más orientada a obtener resultados que a mantener privilegios. Son la parte del sistema empresarial capaz de abordar con éxito las exigencias del mundo de hoy. (Alberto Medina, 2010)

La mayoría de las organizaciones que han tomado conciencia de esta posibilidad, han reaccionado potenciando el concepto de proceso y una visión de objetivo en el cliente. De este modo, los procesos han llegado a ser considerados como la base operativa de gran parte de las organizaciones, y gradualmente se convierten en la base estructural de un número creciente de empresas. (Amozarrain, 1999)

Varios autores consultados ofrecen en sus obras sus criterios sobre lo que es un “proceso” dentro de estos se pueden citar:

- Jurán (1993) definió como proceso cualquier combinación de máquinas, herramientas, métodos, materiales y/o personal empleado para lograr determinadas cualidades en un producto o servicio. Un cambio en cualquiera de esos componentes produce un nuevo proceso
- Según Zaratiegui (1999): Se pueden definir como (...) secuencias ordenadas y lógicas de actividades de transformación, que parten de unas entradas (informaciones en un sentido amplio —pedidos, datos, especificaciones, más

medios materiales —máquinas, equipos, materias primas, consumibles, etcétera), para alcanzar unos resultados programados, que se entregan a quienes los han solicitado, los clientes de cada proceso

- Para Raso (2002) un proceso es una secuencia de actividades que una o varias personas desarrollan para hacer llegar una salida a un destinatario a partir de unos recursos
- Ponjuán Dante et al. (2005) plantea que son un conjunto de actividades interrelacionadas que transforman elementos de entrada en los elementos de salida. Los recursos pueden incluir personal, instalaciones, equipos, técnicas, métodos, información y otros
- Brut Alabart (2007): Secuencia de actividades orientadas a generar un valor añadido sobre una entrada para conseguir una salida (resultado) que satisfaga los requerimientos del cliente
- La ISO 9000-2008 lo define como conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

De todos estos conceptos analizados, el más completo a consideración de la autora es el confeccionado por Alberto Medina (2010), definiéndose de manera integradora como proceso la secuencia ordenada de actividades repetitivas que se realizan en la organización por una persona, grupo o departamento, con la capacidad de transformar unas entradas en salidas o resultados programados para un destinatario ejecutado de una manera eficaz y eficiente para obtener un valor agregado.

Conociendo lo que es un proceso, se puede señalar que estos suelen ser de tipo productivos y se clasifican de acuerdo al producto que se obtenga o el servicio que se preste; según Méndez Delgado (2004), el primero puede ser un bien o mercancía, el cual es tangible y materializado. El segundo puede ser un servicio, el cual es intangible y se concreta en un resultado de naturaleza fundamentalmente no material. Hay empresas de producción de bienes que también suministran servicios y empresas de servicios, que suministran bienes complementarios.

Los procesos de tipo productivos se definen como cualquier actividad económica que genera un valor agregado. Pueden someterse a diversos análisis para enfrentar los problemas que se suelen presentar, como la mejora de su eficiencia por medio de la automatización, los métodos que sirvan para ampliar la productividad, lo mismo en busca de un incremento de la calidad o la sustentación económica. Según el tipo de flujo del producto se pueden clasificar en¹:

- **Procesos por lotes.** Este modo es muy conocido ya que se emplea en grandes empresas productoras. Generalmente la organización se divide en plantas, cada una se especializa en una parte del producto final. El producto llega en cierto estado inicial y va recorriendo cada planta hasta verse completado. Para completar cada área se requiere de operadores de la maquinaria, esta se distribuye a manera de que la producción siga un curso
- **Procesos en cadena.** Muchas personas realizan actividades dentro de la fábrica con ritmos precisos dependientes de los avances previos. Se arma una cadena que transporta el producto según su proceso, el cual depende de las actividades de quienes operan la maquinaria que a la vez completan procesos que las máquinas no pueden efectuar
- **Procesos tipo proyecto:** Aquí la producción se desarrolla en un sitio específico que cumple con las condiciones adecuadas para el trabajo o que es el área a ser aprovechada. Este método requiere planificación y programación antes de comenzar la ejecución. Se concibe que los laboratorios o pozos petroleros siguen este tipo de proceso para su producción
- **Procesos continuos:** En este caso se trata de procesos en donde una red de depósitos forma una serie que la materia prima debe recorrer para transformarse en el producto final. Aquí no es tan imprescindible la intervención de personal en cada área, sino que se requiere de pocas personas que supervisen y realicen actividades discretas, es decir, el proceso es meramente automatizado.

¹ Obtenido de <http://www.quiminet.com/empresas/tipos-de-procesos-de-la-produccion-2746373.htm>

1.1.1 Los procesos continuos.

Esta investigación se enfocará principalmente en el sistema de flujo continuo, pues la entidad de referencia opera bajo el sistema de procesamiento continuo, de ahí, que este es empleado por las empresas que producen un determinado producto, sin cambios, por un largo período. El ritmo de producción es acelerado y las operaciones se ejecutan sin interrupción. Como el producto es el mismo, el proceso de producción no sufre cambios seguidos y puede ser perfeccionado continuamente. Este tipo de producción es aquel donde el contenido de trabajo del producto aumenta en forma continua. Entonces la operación continua significa que al terminar el trabajo determinado en cada operación, la unidad se pasa a la siguiente etapa de trabajo sin esperar todo el trabajo en el lote. Para que el trabajo fluya libremente los tiempos de cada operación deberán de ser de igual longitud y no debe aparecer movimiento hacia fuera de la línea de producción. Por lo tanto la inspección deberá realizarse dentro de la línea de producción de proceso, no debiendo tomar un tiempo mayor que el de operación de la unidad. Además como el sistema esta balanceado cualquier falla afecta no solo a la etapa donde ocurre, sino también a las demás etapas de la línea de producción.

Como no es de extrañar en estos sistemas de producción continua se hace imprescindible la evaluación y diagnóstico de los procesos para el logro de mayores niveles de eficiencia en las operaciones. Para esto existen numerosas herramientas y técnicas que permiten monitorear estos sistemas y tomar decisiones en casos pertinentes.

1.2 Herramientas para la evaluación de procesos productivos.

El análisis y evaluación de los procesos productivos adquiere una gran importancia, pues nos da la posibilidad de darle solución a problemas existentes de una forma correcta, lógica y sistemática además de realizar mejoras dentro de las organizaciones actuales.

Para realizar en forma adecuada el diagnóstico y evaluación de los procesos es necesario utilizar las herramientas y técnicas específicas que han sido elaboradas para cumplir este objetivo. Ellas nos permiten obtener datos e información confiables, de fácil interpretación y comprensión, identificar los problemas

existentes en los procesos y las causas que los generan y determinar el impacto real y concreto de cualquier modificación que se proponga realizar. Es de interés sentar las bases en ellas para la toma de decisiones y así evitar recurrir a la intuición, el sentido común y el buen juicio. Según las bibliografías consultadas entre las herramientas más utilizadas en el diagnóstico y evaluación de los procesos se encuentran el brainstorming o tormenta de ideas, diagramas de afinidades, diagramas de interrelaciones, matriz de actividades con problemas, diagrama causa-efecto, gráfico de control, diagrama de Pareto, histogramas y el benchmarking, también existen otras de suma importancia para las evaluaciones de procesos como las entrevistas, encuestas, etc. pero enfatizaremos en las anteriores.

Según (Halliburton, Peñarando, López, Funes, Testa, & Machado, 2006) en una primera etapa del trabajo de diagnóstico y evaluación es aconsejable utilizar herramientas y técnicas como el brainstorming, los diagramas de afinidades, de interrelaciones y de causa y efecto y la matriz de áreas con problemas.

Muchos autores (Arosemena 2013, Lorena 2005, Hernández 2009) concuerdan en diferenciar estas técnicas de acuerdo al comportamiento de los resultados obtenidos (técnicas cualitativas) o en cuanto a la comparación numérica de sus resultados (técnicas cuantitativas).

1.2.1 Herramientas y Técnicas Cualitativas.

Brainstorming o tormenta de ideas²

Es una herramienta de trabajo grupal que facilita el surgimiento de nuevas ideas sobre un tema o problema determinado. Fue creada en el año 1941, por Alex Osborne, cuando su búsqueda de ideas creativas resultó en un proceso interactivo de grupo no estructurado que generaba más y mejores ideas que las que los individuos podían producir trabajando de forma independiente.

Permite plantear y resolver los problemas existentes, plantear posibles causas, soluciones alternativas, desarrollar la creatividad, discutir conceptos nuevos así como superar el conformismo y la monotonía.

² Disponible en <http://www.gestiopolis.com/brainstorming-lluvia-o-tormenta-de-ideas/autores>

Diagrama de afinidades³

El método-KJ, denominado posteriormente diagrama de afinidad, fue desarrollado en la década de 1960 por el antropólogo japonés Jiro Kawakita. Es una herramienta que sintetiza un conjunto de datos verbales (ideas, opiniones, temas, expresiones, etc.) agrupándolos en función de la relación que tienen entre sí. Se basa en el principio de que muchos de estos datos verbales son afines, por lo que pueden reunirse bajo unas pocas ideas generales.

Diagrama de interrelaciones⁴

El Diagrama de Interrelación es una herramienta que permite identificar de una forma gráfica y muy visual las relaciones o conexiones lógicas entre diferentes ideas o datos relacionados con un problema o situación que estamos estudiando, de forma que se pueda visualizar los diferentes niveles causales entre ellos. Es decir, busca que de un simple vistazo se pueda comprender como está estructurado un problema y las causas que lo han provocado, para así poder aplicar de forma posterior las acciones correctas y precisas para resolverlo e impedir que se repita en el futuro.

Matriz de actividades con problemas⁵

La matriz de actividades con problemas se utiliza como medio para focalizar el análisis de los problemas que el equipo de trabajo haya logrado establecer. Permite, además, enfocar el mejoramiento de áreas específicas del proceso con valor agregado. Es un instrumento adecuado para ser utilizado una vez obtenidos los resultados del brainstorming, el diagrama de procesos y otras herramientas y técnicas (entrevistas, encuestas, etc.).

Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa)⁶

El diagrama de Ishikawa se conoce también por los nombres de diagrama de espina de pescado o diagrama de causa-efecto. La herramienta fue concebida por

³ Disponible en <http://www.aiteco.com/diagrama-de-afinidad/>

⁴ Tomado de Consultora de Sistemas de Gestión y Normas ISO disponible en <http://www.s bqconsultores.es/wp-content/uploads/2015/08/diagrama-de-interrelaciones-SBQ-Consultores>

⁵ Manual para Análisis, Evaluación y Reingeniería de Procesos en la Administración Pública

⁶ Ídem

el licenciado en química japonés el Dr. Kaoru Ishikawa en el año 1943, quien fue un experto en el Control de Calidad.

La originalidad y particularidad de este diagrama es que circunscribe las causas probables de los problemas en categorías bien definidas y diferenciadas, aplicables a todo tipo de proceso que se desarrolla en una organización. Estas categorías son, en general, conocidas como las “5m”: Mano de Obra, Máquinas, Método, Materia Prima y Medio Ambiente. Este diagrama permite por medio de la representación gráfica visualizar en forma clara las posibles causas y su interdependencia y orienta al equipo en la identificación de aquellas que puedan estar originando el problema o deficiencia en el proceso.

Benchmarking⁷

El Benchmarking fue concebido en el año 1982 durante una reunión de la Corporación Xerox. Es de utilidad para comparar y evaluar, adoptando aquellos elementos (tecnologías, tipos específicos de hacer) que permitan mejorar nuestro proceso. Constituye una guía poderosa hacia las prácticas que deberían adoptarse, a las ideas que pueden adaptarse y a las necesidades particulares que las organizaciones necesitan satisfacer para cumplimentar sus objetivos. En este sentido el benchmarking debería aportar una agenda para el cambio sustentada en experiencias reales de las mejores prácticas.

1.2.2 Herramientas y Técnicas Cuantitativas.

Gráficos de Control⁸

Los gráficos de control tienen su origen al final de la década de 1920, cuando Walter A. Shewhart analizó numerosos procesos de fabricación concluyendo que todos presentaban variaciones.

Se define como un diagrama que sirve para examinar si un proceso se encuentra en una condición estable, o para asegurar que se mantenga en esa condición.

Existen diferentes tipos de gráficos de control:

- De datos por variables. Que a su vez pueden ser de media y rango, mediana y rango, y valores medidos individuales

⁷ Ídem a referencia 5

⁸ Obtenido de <http://www.aiteco.com/herramientas-y-métodos-de-mejora/gráficos-de-control/>

- De datos por atributos. Del estilo aceptable / inaceptable, sí / no, etc.

Diagrama de Pareto⁹

En 1909 el economista y sociólogo Vilfredo Pareto (1848 – 1923) publicó los resultados de sus estudios, observando que el 20 % de las causas producen el 80 % de los efectos.

El objetivo de esta herramienta es clasificar elementos o factores en dos categorías: Las "Pocas Vitales" (los elementos muy importantes en su contribución) y los "Muchos Triviales" (los elementos poco importantes en ella). Pero el objetivo más importante a alcanzar con este diagrama es el de detectar frecuencias de errores o problemas y determinar su importancia relativa en relación al resto de los encontrados en el proceso.

Histogramas¹⁰

El histograma es un gráfico que vuelve visible la dispersión de datos de un proceso y define acciones requeridas para su control y seguimiento. Su uso más habitual es cuando se busca determinar los desvíos o variaciones de los datos o información que fluye por los procesos en relación a las especificaciones y tolerancias determinadas. La esencia de esta herramienta es, pues, identificar patrones de comportamiento de la información, difíciles de visualizar en listados o tablas, lo que permitirá un mejor y más profundo análisis aplicado a las mejoras o rediseño de los procesos.

La simulación de procesos.

Sin dudas todas las herramientas y técnicas antes explicadas son muy necesarias para realizar de forma adecuada la evaluación de procesos pero para cuando estos se vuelven muy complejos y no es posible obtener una solución analítica, lo ideal sería el empleo de métodos más especializados como la simulación, herramienta muy utilizada en la ciencia de la administración y que es una de las mejores para observar sistemas reales en operación sin tener que detener el sistema para poder analizarlo. Según la web oficial de Lander Simulation & Training Solutions S.A su nacimiento data desde el año 1777 en el que se plantea

⁹ Manual para Análisis, Evaluación y Reingeniería de Procesos en la Administración Pública.

¹⁰ Ídem

el problema de “La aguja de Buffon”¹¹, y ha tenido una trayectoria evolutiva a la largo de los años hasta alcanzar una gran complejidad. Su uso va dirigido hacia la toma de decisiones a nivel empresarial y en la resolución de problemas en disciplinas asociadas no sólo al diseño, planeación y control de sistemas de manufactura, sino en otras como mercadotecnia, recursos humanos y finanzas. Se ha extendido, además, a la educación, la medicina, la biotecnología, la farmacología, la aeronáutica e incluso al sector del ocio al entrar en el ámbito familiar con productos de software sofisticados como los simuladores de conducción, de vida, de vuelo, entre otros.

La simulación de un sistema puede realizarse ya sea de forma manual o computacional de acuerdo a la complejidad de las relaciones de sus componentes. Si las relaciones que componen el modelo del sistema son lo suficientemente sencillas, es posible utilizar métodos matemáticos como álgebra, cálculo, o teoría probabilística para obtener la información exacta de la problemática en cuestión; esto es lo comúnmente llamado una solución analítica. Sin embargo, los sistemas reales son demasiado complejos como para permitir modelos realistas que puedan ser evaluados analíticamente, por lo que deben ser estudiados a través de la simulación en la que se utiliza la computadora para evaluar el modelo numéricamente, y los datos son compilados para estimar las características verdaderamente deseadas del modelo. (Law & Kelton, 2000)

En teoría de simulación, se entiende como sistema a las diferentes operaciones o procesos que se realizan en la vida real y que son objeto de interés para realizar su simulación. Para que el sistema pueda ser estudiado satisfactoriamente, por lo general se efectúan suposiciones sobre su comportamiento, los cuales llegan a tomar forma matemática o lógica y constituir un modelo que es utilizado para poder comprenderlo con mayor facilidad.

Actualmente el uso de la simulación permite proporcionar una percepción clara a ciertos problemas de toma de decisiones donde la evaluación matemática de un modelo no es posible. En general los modelos de simulación difieren de los

¹¹ Método matemático sencillo diseñado para determinar el valor aproximado de π a partir de sucesivos intentos.

modelos matemáticos en dos aspectos fundamentales: los modelos de simulación normalmente no se diseñan para encontrar soluciones óptimas o mejores, como se hace en la programación lineal, sino se evalúan diversas alternativas propuestas y se toma una decisión con base en la comparación de resultados; por otro lado, a diferencia de los modelos matemáticos, los modelos de simulación pueden representar al sistema como un todo y no en forma parcial por lo que todas las relaciones de causa y efecto entre los diferentes componentes del modelo son consideradas en todos los experimentos del sistema.

Los recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software que actualmente existe en el mercado, han hecho de la simulación una de las herramientas más ampliamente usadas en la investigación de operaciones y ciencias administrativas (Law & Kelton, 2000), dadas las amplias ventajas que ofrece en casi todas las áreas posibles al permitir observar sistemas reales en operación sin necesidad de detenerlos para poder analizarlos.

De acuerdo con Himmelblau & Bischoff (1973) la simulación de procesos constituye un elemento muy importante para la toma de decisiones más científicas y responsables si se considera que entre sus prerrogativas se encuentra la posibilidad de estudiar procesos más rápida, económica y completamente que en una planta o sistema real; se pueden ensayar intervalos extremos de las condiciones de operación, que pueden ser impracticables o imposibles de realizar en una planta real y determinar la compatibilidad de nuevas modificaciones y reproducir sus resultados.

Aparejado a las ventajas que ofrece la simulación, algunos autores como (Azarang & García, 1996), (Chung, 2004), (Law & Kelton, 2000) y (Tarifa, 2001) han referido la existencia de desventajas asociadas a su uso tales como su incapacidad de obtener resultados precisos con datos de entrada inexactos, la imposibilidad de proveer respuestas fáciles para problemas complicados, el elevado costo en tiempo y efectivo para el desarrollo y validación del modelo, la imposibilidad de conocer a ciencia cierta el grado de precisión de los resultados y la falsa sensación de seguridad que puede causar la solución del modelo.

A pesar de estos inconvenientes, la utilidad del uso de la simulación en el ámbito empresarial actual es innegable; además, en la literatura se ha encontrado que el uso de modelos gráficos para la simulación de procesos de negocios empieza a ser más utilizada ya que arroja mejores resultados que los modelos matemáticos. Paralelamente, los avances obtenidos a lo largo de los años en el diseño de software han permitido el desarrollo de numerosas herramientas capaces de soportar la construcción de modelos y la simulación basada en el análisis de sistemas, muchas de las cuales permiten al usuario construir modelos gráficamente a fin de que no le sea preciso escribir las ecuaciones matemáticas o entender completamente los métodos numéricos por los cuales las ecuaciones son solucionadas durante la simulación. (Barnett, 2003)

1.3 Procedimientos para la simulación de procesos asistida por computadoras.

A lo largo de los años la manera de organizar proyectos de modelamiento ha sido globalmente constante, evolucionando en pequeños detalles conforme aumenta el número de autores interesados en el campo. (Schaffernicht, 2008)

Muchos han sido los procedimientos diseñados para la simulación de procesos asistida por computadoras brindando aportes para el mejoramiento de los procesos complejos a través de métodos más sencillos, entre los que se destacan, el procedimiento propuesto por Himmelblau & Bischoff (1973) que está diseñado para modelar sistemas complejos en el marco del análisis de proceso. Según el autor, luego de formular el problema y establecer las necesidades de operación, es necesario establecer una inspección preliminar y la posterior clasificación del proceso con el objetivo de descomponerlo en diferentes subsistemas. La premisa de que el proceso global se puede descomponer en subsistemas diferentes y que existen relaciones entre ellos, permite modelar procesos complejos cuyas características dificultan su completo conocimiento y descripción; además al permitir la manipulación de los subsistemas es posible obtener una representación razonablemente correcta del proceso total basada en principios relativamente sencillos.

Para garantizar este carácter sistémico, Aracil (1995) concuerda en la necesidad de descomponer el sistema en las distintas partes que lo conforman y, mediante la utilización de diagramas como herramientas de apoyo para conformar el modelo del proceso, establece un nexo entre la estructura del sistema (su diagrama de influencias o causal¹²) y su comportamiento. El autor refiere brevemente la posibilidad del uso de la computadora para llevar a cabo esta tarea, pero no ahonda al respecto, limitándose solamente al análisis de cuestiones analítico-matemáticas.

A diferencia de lo anteriormente expuesto Banks, Carson, & Nelson (1996) proponen una metodología altamente fraccionada o dividida que incluye explícitamente la implementación del modelo en una computadora mediante la utilización de algún lenguaje de computación.

Otros procedimientos desarrollados siguen una línea muy similar, por ejemplo, la metodología para un estudio de simulación a la que alude Barceló (1996) menciona tres pasos menos que los descritos por Banks, Carson, & Nelson (1996) pero que, a los efectos, se encuentran contenidos unos dentro de otros. La metodología propuesta por Azarang & García (1996) incluye una diferenciación entre decisores¹³ y analistas al incorporar dentro de la definición del sistema que la opinión o descripción dada por los primeros debe ser avalada por los segundos (se habla en términos computacionales y estadísticos).

Con el desarrollo de la simulación como herramienta en el campo empresarial Giaglis, Paul, & Hlupic (1999) proponen un procedimiento que pretende integrar las metodologías de simulación con aspectos genéricos de diseño organizacional basándose en el principio de que "...las técnicas para construir modelos de simulación están, por naturaleza, orientadas a los procesos..."

Esta metodología consta de cuatro etapas fundamentales (inicio, simulación, experimentación, conclusión) desglosadas en tareas que integran los objetivos y alcance del diseño organizacional y los de la simulación. Al operar bajo este

¹² Representación de las relaciones e influencias de los elementos de un sistema

¹³ Personal encargado de la toma de decisiones sobre el sistema en base a los resultados obtenidos en el estudio de simulación

principio, tanto decisores como analistas coinciden en una misma terminología de trabajo lo que permite el intercambio fluido de ideas entre ellos.

Por su parte, Sifuentes, Dávila, Toledo, Carbajal, & Uribe, (2000) exponen un procedimiento, compuesto por siete pasos, básico y muy general, ideado para principiantes y basado en la estrategia “Aprendizaje basado en problemas” y en la estrategia de resolución de problemas “Método heurístico de seis pasos de McMaster”.

Algunos autores han desarrollado metodologías más abarcadoras y profundas. Por ejemplo, Chung (2004) propone un procedimiento integrado por siete pasos subdivididos en varias tareas. Esta metodología se presenta como un manual de modelos de simulación en la que se enfatiza, en cada paso, las posibles técnicas y herramientas a utilizar para lograr el éxito del estudio.

Otros autores combinan diferentes metodologías y métodos desarrollados anteriormente para obtener procedimientos basados en las fortalezas de otros. Schaffernicht (2006), por ejemplo, referencia a Forrester (1961) y Sterman (2000) para generar un procedimiento enfocado hacia los destinatarios del modelo. Mediante la oportunidad de intervenir con propuestas, revisiones y críticas, se opera bajo el supuesto de que: “(...) ellos son parte de un sistema que genera su problema, ellos deben comprender el modelo, ellos deberán aceptar sus consecuencias...” (Schaffernicht, 2008). Como parte de la última etapa del procedimiento el autor considera que la implementación no debe ser tomada a la ligera, pues constituye una prueba empírica para comprender las necesidades de mejora.

Asimismo, Moncho (2008) propone una metodología general y muy eficiente para modelar sistemas complejos basada en el procedimiento propuesto por Caselles (1993). Esta metodología contiene los métodos parciales e ideas de autores como Forrester (1961 y 1966), Checkland (1981), Morecroft (1982), Balci (1986), Mathewson (1989), Zhang et al. (1990) y Caselles (1992 y 1993a), conteniéndolos completamente dentro de un entorno informático.

Autores más recientes como Belda & Grande (2009) proponen una metodología que logra aprovechar las ventajas de la aplicación de los modelos de simulación

en la planificación y gestión estratégica de las empresas. Este procedimiento está esbozado para empresas muy dinámicas, con tiempos de colas que se deben disipar óptimamente y procesos de reingeniería en constante uso.

Otros autores en la literatura como Nance (1981), Law & Kelton (1991 y 2000), DoD Modeling & Simulation (2001), Law (2006), Delgado (2011) y Aalst, (2011) han hecho referencia sobre las etapas, fases o pasos necesarios para el desarrollo de trabajos de simulación computacional en cualquier sistema.

Por otro lado Aldana Castillo (2016) propone un procedimiento que tiene la finalidad de facilitar al analista la confección de modelos de simulación sin la necesidad de confeccionar modelos lógico-matemáticos complejos y/o utilizar lenguajes de programación para realizar la simulación.

Cada autor enfoca el problema de manera diferente, aunque la mayoría de ellos concuerda en la importancia de seguir una metodología deliberada para lograr simulaciones computacionales eficientes.

El Anexo 1 muestra un resumen comparativo de los procedimientos mencionados en el que se aprecia el grado de coincidencia entre algunos de sus elementos.

Para seleccionar el procedimiento para la simulación de procesos asistida por computadoras más adecuado, fueron sometidos a una valoración mediante el método Delphi (Anexo 3) los elementos que incluyen los procedimientos analizados anteriormente, donde se escogieron 9 expertos para el análisis obteniendo como resultado que los elementos más importantes a tener en cuenta en la simulación de procesos según los expertos, coinciden con el procedimiento descrito por Aldana Castillo (2016), este tiene como objetivo ser de fácil manejo e interpretación para profesionales que no sean especialistas en el tema de la simulación, dotando a la organización de una valiosa herramienta para aplicar en un futuro a cualquier tipo de proceso.

1.3.1 Procedimiento para la simulación asistida por computadoras propuesto por Aldana Castillo (2016).

El procedimiento escogido para la simulación computacional de procesos productivos consta de 3 etapas y dentro de ellas 11 pasos, con el propósito de guiar al analista para realizar un correcto estudio de simulación, además de ser de

utilidad en el diagnóstico y mejora de procesos en pequeñas, medianas o grandes empresas; facilitar el desarrollo de estudios de simulación en empresas que requieran la utilización de esta herramienta, también se desea con este, permitir a decisores empresariales llevar a cabo ellos mismos la simulación computacional o ser participantes activos en el proceso. (Ver Anexo 4)

Etapa 1: Preparación inicial

Objetivo: Sentar las bases para la correcta implementación del estudio

Paso 1: Caracterizar la organización

Técnicas: Revisión documental, consultas a expertos, etc.

Paso 2. Definir problema y objetivos del estudio

Técnicas: Brainstorming, Delphi, grupos nominales, gráfica de Pareto, diagrama causa efecto, consulta a expertos, etc.

Paso 3. Asegurar la implicación y compromiso de la gerencia

Técnicas: Observación, revisión documental, consultas a expertos, entrevistas, cuestionarios y otras similares

Paso 5. Analizar y describir del proceso

Tarea 1. Determinar responsable(s) y objetivos del proceso

Técnicas: Revisión documental, brainstorming, consulta a expertos, etc.

Tarea 2. Descripción verbal del proceso

Técnicas: Revisión documental, consulta a expertos

Paso 6. Evaluar y seleccionar la tecnología de simulación

Etapa 2. Modelado y experimentación

Objetivo: Obtener, del modelo de simulación, resultados análogos a los del sistema real

Paso 7. Analizar el sistema

Tarea 1. Definir el sistema y objetivos del modelo

Técnicas: Consultas a expertos, Delphi, Kendall, etc.

Tarea 2. Modelado del sistema

Actividad 1. Representación del sistema

Técnicas: Revisión documental, brainstorming, consultas a expertos, etc.

Actividad 2. Identificar y seleccionar las variables más relevantes

Técnicas: Consulta a expertos, revisión documental, brainstorming, Delphi, etc.

Paso 8. Validar el modelo

Paso 9. Experimentar

Etapa 3. Control y mejora

Objetivo: Tomar decisiones de mejora en función de los resultados alcanzados

Paso 10. Analizar resultados

Paso 11. Mejora continua

Este procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos será aplicado en la planta de Lixiviación de la empresa mixta Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A. y debido a la complejidad del proceso para su comprensión, el siguiente epígrafe está dirigido al análisis del mismo.

1.4 El proceso de lixiviación, características y principales indicadores de eficiencia.

La lixiviación es la extracción selectiva en la que una mezcla o fase sólida se descomponen en sus componentes o en la que un componente valioso se quita y recupera de una masa sólida mediante el tratamiento por un líquido. En general las operaciones que comprenden el tratamiento del sólido por disolventes incluyen cierto número de circunstancias. El sólido suele consistir en una mezcla heterogénea de varios constituyentes de los cuales pueden ser líquidos o sólidos en disolución, pero pueden ser unas mezclas homogéneas tal como una solución sólida o una sal doble. Los sólidos que se lixivian se hallan en una diversidad de formas físicas y a menudo se requiere su desintegración para formar una gran superficie de contacto con el disolvente. Consiste en que el líquido al penetrar en los poros del cuerpo sólido disuelve los componentes a extraer o entra en reacción con ellos; la sustancia, que pasa a la solución (o el producto de la reacción) se difunde hacia la superficie del cuerpo sólido y pasa a la masa fundamental del líquido. (Manual de Operaciones de Lixiviación)

Este proceso permite trabajar yacimientos que suelen ser calificados de baja ley (y por tanto de más alto costo de producción por tonelada) siempre que la operación minera involucre una actividad a gran escala. Es decir, que la lixiviación es un proceso de recuperación que hará económico un proyecto conforme se

trabajen mayores volúmenes de material. Algunos de los factores que intervienen en ella son el tamaño de la partícula, característica del mineral, concentración del disolvente o lixivante y el tiempo de contacto y temperatura. Existen diversos métodos de lixiviación que se usan para el tratamiento de minerales, entre los que se pueden mencionar:

- **Lixiviación in situ (en el lugar):** Es la aplicación de soluciones directamente sobre el mineral que está ubicado en el yacimiento, sin someterlo a labores de extracción minera. Debido a sus bajos costos de inversión es una técnica factible para la recuperación de metales de muy baja ley, no explotables económicamente por otros métodos
- **Lixiviación en pilas:** Se acumulan cerca de las minas y alcanzan alturas de 100 m y más. Necesita poco capital de inversión y operación. Se aplica a minerales de cobre, uranio, oro y plata de baja ley, que no presentan problemas de extracción
- **Lixiviación en bateas o percolación:** La lixiviación en bateas, “vat leaching”, consiste en circular una solución, a través de un lecho de mineral, previamente triturado. Se realiza normalmente en contracorriente, es decir donde el mineral fresco se encuentra con soluciones viejas y el mineral viejo con soluciones frescas
- **Lixiviación por agitación:** Se agita una pulpa formada por partículas finas y reactivas. Se utiliza para menas de alta ley o cuya especie útil es de alto valor comercial, debido a los grandes costos de inversión. Su objetivo es tener recuperaciones más altas en tiempos más cortos. Usualmente se utiliza para lixiviar calcinas de tostación y concentrados, y es empleada en la extracción de cobre, oro, plata, entre otros
- **Lixiviación bacteriana:** Se utiliza para la recuperación de cobre, zinc, oro y uranio.

La Empresa mixta Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A para la obtención de su producto final sulfuro de níquel + cobalto, no utiliza un método sino una tecnología de lixiviación para el tratamiento de la limonita, denominado **lixiviación ácida a presión**, lo que la hace única de su tipo en el mundo pues no

se conoce otra con iguales características. Existe también la tecnología de **lixiviación carbonato amoniacal (proceso Caron)** que se utiliza en la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara de Moa pero al compararla con la usada en la Moa Nickel S.A esta incurre en mayores gastos de combustible y energía además de lograr un menor porcentaje en la eficiencia de extracción de níquel, por tanto la primera posee mayor ventaja.

La lixiviación ácida a presión se efectúa bajo condiciones específicas y apropiadas de operación como son: temperatura, presión y otros factores que influyen y que determinan al mismo, los cuales son llevados a cabo en un sistema de reactores.

Los parámetros más importantes que influyen en este proceso son:

- Presión y temperatura óptimas para la extracción de los elementos
- Intensidad de la agitación
- Consumo específico de ácido sulfúrico
- Porcentaje de sólidos en la pulpa
- Relación ácido-mineral
- Tiempo de retención
- Granulometría del sólido alimentado
- Composición química de la pulpa alimentada: Níquel (Ni), Cobalto (Co), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Silicio (Si), Cromo (Cr).

En el gráfico de solubilidad (Figura 1.1) se puede observar la estrecha relación entre la presión y la temperatura y la solubilidad de cada óxido de metal. El níquel y el cobalto, por poseer características similares se encuentran muy unidos en las menas lateríticas, de ahí que en la lixiviación con ácido, se obtiene un licor rico de ambos elementos.

Es importante que se comprenda que las condiciones de la lixiviación (presión y temperatura) deben estar en equilibrio para garantizar el mayor grado de solubilidad de estos.

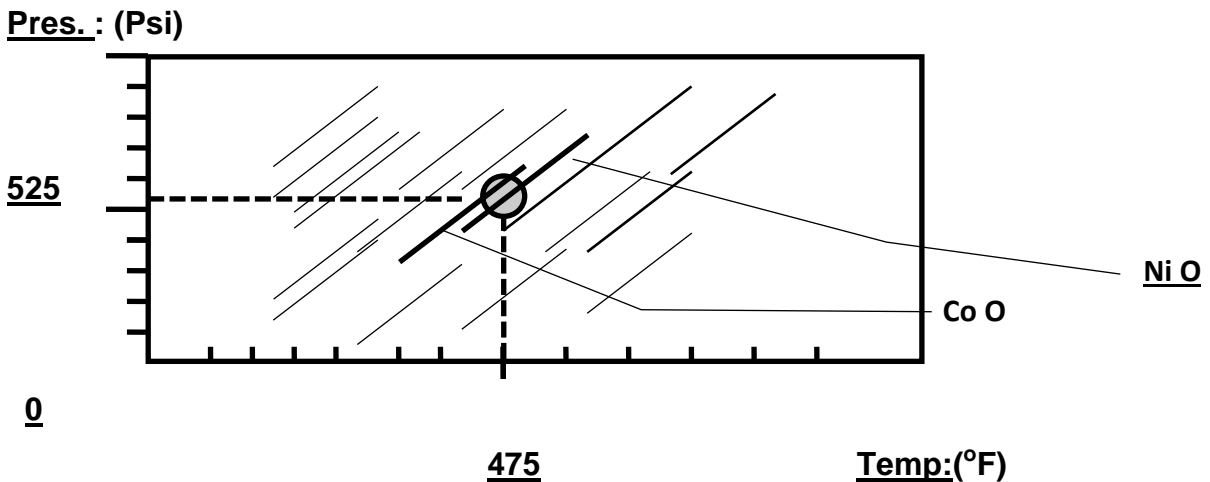


Figura 1.1 Gráfico de solubilidad de los metales oxidados con ácido sulfúrico

Fuente: Manual de la planta de Lixiviación

1.4.1 Breve descripción del flujo tecnológico del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa Nickel S.A.

El proceso de lixiviación ácida de óxidos de níquel y cobalto tiene lugar en cinco unidades o trenes que cuentan con cuatro reactores verticales continuos (A, B, C y D) cada uno, con agitación conectados en serie. Los reactores cumplen la función de lixiviar el mineral y están provistos de un tubo central por donde transita la pulpa lixiviada a los demás reactores, en estos se efectúa la agitación con vapor de 650 lb/pulg² y por la parte superior del primer reactor de cada tren se inyecta ácido sulfúrico (H₂SO₄) que es el agente lixivante. Una vez que la pulpa de mineral y el ácido entran al primer reactor (A), la presión del vapor los hace fluir por el tubo central obligándolos a mezclarse hasta que salen por el último reactor (D) del sistema, obteniéndose los sulfatos deseados junto con otros componentes. (Anexo 5)

1.4.2 Situación actual del sistema de pulpa alimentada a los precalentadores de la planta de Lixiviación.

El flujo de alimentación de pulpa a la planta entra a la misma por dos líneas de acero al carbono, una de 20 pulgadas de diámetro asistida por dos bombas centrífugas ubicadas en la planta de Espesadores de pulpa, y la otra de 18 pulgadas de diámetro asistida por dos bombas reforzadoras que operan en área de la planta de Lixiviación. Estas alimentan directamente a tres precalentadores

donde el flujo entra en cada uno de ellos por sus partes superiores e intercambian calor por contacto directo de vapor de 15 Lb/pulg² con el mineral lográndose una temperatura entre 180 y 195 °F. El flujo de vapor a estos recipientes está regulado por válvulas automáticas que operan en función del flujo de pulpa alimentada. Finalmente el mineral precalentado es enviado por gravedad a tres tanques de almacenamiento de acero al carbono, provisto de agitación mecánica con capacidad cada uno para 150 000 galones.

Actualmente existe un cabezal común distribuidor de pulpa antes de precalentarla que está presentando deficiencias por desgastes en su parte interior y el tiempo de uso expuesto a la abrasividad de la arena que transita junto al mineral por lo que se hace necesario su sustitución previendo una parada de la planta por fallo del flujo de alimentación de pulpa. La dirección de la planta tiene como alternativa, bajar la capacidad de la misma hasta donde alcance el nivel inferior permisible de los tanques de almacenaje siempre que fuera posible cumplir con el tiempo que se establezca para el cambio de dicho cabezal, siendo así, una vez cambiado este se restablecería las operaciones normales a igual capacidad que antes del cambio.

Debido a que antes no se había experimentado un cambio de este tipo (en operaciones) no es seguro que se cumpla con el tiempo programado además de que puede presentarse irregularidades en el montaje (izaje, coordinación del trabajo, herramientas, inclemencias del clima, fallo de fabricación de las piezas, etc.), en este caso, es inminente la parada de la planta de forma gradual, que no debe ser menor a las 48 horas producto a las imprecisiones inherentes a un montaje de nuevo tipo, nunca antes realizado en esta línea, el mantenimiento, la limpieza, etc. Con el proceso de lixiviación detenido por este tiempo se afectan las demás plantas del flujo productivo como Preparación de pulpa que se detiene al haber alto inventario en los tanques sedimentadores de la planta de Espesadores con capacidad de hasta 85 000 toneladas, se afecta también la planta de Lavaderos que al no recibir mineral procesado de Lixiviación detiene su bombeo de licor-producto a la planta de Neutralización, aunque se mantiene recirculando entre sus tanques de decantación a contracorriente. La planta de Neutralización

detiene el bombeo del licor-producto al precalentador de licor en Lixiviación y a continuación se detiene la planta de Precipitación de sulfuros por fallo de licor y vapor de 15 lb/pulg² que le suministra Lixiviación, además las plantas auxiliares (Termoeléctrica y planta de Ácido) deben bajar la producción de vapor y ácido respectivamente ya que la mayor consumidora de estos productos es Lixiviación, de esta forma queda detenido por el tiempo necesario el proceso y la producción de níquel en la fábrica.

La producción de la fábrica como se demuestra anteriormente depende completamente de la planta de Lixiviación, por tanto al hacer un análisis económico de las pérdidas que se pueden ocasionar al haber afectaciones en el proceso, es válido tomarla como referencia. La misma procesa diario alrededor de 8 780 toneladas de mineral seco procedente de la planta de Espesadores, con una eficiencia metalúrgica por encima de 93%, lo que equivale a 21 627 toneladas de pulpa por día con 40% de sólidos. Con el detenimiento de Lixiviación y las demás plantas se vería afectado el plan de producción que es de 37 503 toneladas/año lo que implica un plan diario de 102.46 toneladas de sulfuro de níquel más cobalto (Ni+Co) como producto final. En las condiciones de plan, con 48 horas de afectación a la planta de Lixiviación se dejarían de producir 204.93 toneladas de Ni+Co y teniendo en cuenta el precio estimado del níquel en el trimestre de enero a marzo del 2016 que fue de aproximadamente 4.5 pesos por libras (USD/Lb) equivalente a 9 900 pesos por toneladas (USD/Ton) para un costo de operación en el orden de los 8000 USD/Ton se reportarían pérdidas de alrededor de 2 028 846.60 pesos en USD. Por lo que se hace necesario realizar la sustitución urgente de este cabezal distribuidor.

Capítulo II: Aplicación del procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos en la empresa mixta Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A.

Este capítulo tiene como objetivo aplicar el procedimiento diseñado por Aldana Castillo (2016) en la empresa mixta Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A. dándole solución de esta forma al problema profesional planteado en la investigación y cumplir con el objetivo general.

2.1 Etapa I: Preparación inicial

Esta etapa permitió sentar las bases para el cumplimiento de los objetivos del procedimiento ya que se pudo caracterizar la organización, asegurar la implicación y compromiso de la gerencia, crear el grupo de trabajo así como describir el proceso y seleccionar la tecnología de simulación a utilizar.

Paso 1: Caracterización de la organización

La empresa Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A. está ubicada en la Avenida Demetrio Presilla S/N, Reparto Rolo Monterrey, Moa-Holguín, Cuba. La fábrica fue creada en los últimos años de la etapa neocolonial cubana, al dictarse la Ley de Minas e intervenirse, los americanos se marcharon del país y dejaron la empresa completamente paralizada, llevándose consigo los planos y todos los materiales de una tecnología, en esos momentos y aún, única de su tipo en el mundo. Pero en julio del año 1961 se pone en marcha por iniciativa del Comandante Ernesto Che Guevara, Ministro de Industrias de Cuba, contando para ello con la ayuda del ingeniero cubano Demetrio Presilla, produciendo la misma, por primera vez Sulfuro de Níquel más Cobalto.

A partir del año 1994 y por el acuerdo No. 2791 del Consejo de Estado y de Ministros se crea Moa Nickel S.A. entre General Nickel Company (GNC) de Cuba y Sherritt Inc. de Canadá, compartiendo al 50% tres importantes empresas: la planta Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A que produce el sulfuro de níquel más cobalto; la Cobalt Refinery Company Inc. (COREFCO), de Fort Saskatchewan, península de Alberta, Canadá encargada de refinar ambos metales, y la International Cobalt Company Inc. (INTERCO) con sede en Bahamas, que comercializa el producto final. (Ver figura 2.1)

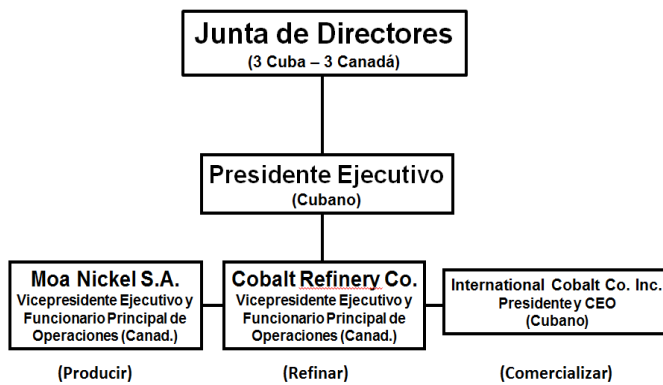


Figura 2.1 Esquema general empresa de metales

La empresa se subordina de manera directa al Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y forma parte del Grupo Empresarial CUBANIQUEL con sede en Moa. Ha sido seleccionada por 9 años consecutivos como Vanguardia Nacional, recibió la medalla Jesús Menéndez, la bandera de Proeza Laboral y la Condición de Héroes del Moncada por 17 años consecutivos.

Misión: “Somos pieza fundamental de la industria de metales, producimos sulfuros mixtos de Níquel más Cobalto con calidad y eficiencia para favorecer entornos duraderos, limpios y agradables, para ello contamos con un capital humano altamente calificado y preparado, comprometidos todos con la sociedad, la calidad de las producciones y el cuidado medio ambiente”.

Visión: “Ser una empresa líder en la producción de Sulfuro de Níquel más Cobalto con calidad certificada por las normas internacionales, minimizando los daños ambientales y con un capital humano altamente calificado y preparado”.

Según la escritura pública 3224/94 del Ministerio de Justicia, el objeto social de Moa Nickel S.A. es producir y comercializar sulfuros mixtos de níquel y cobalto.

La estructura organizativa de la entidad está presidida por el Funcionario Principal de Operaciones a quien se subordina el Departamento de Servicios Legales y la Subdirección General (integrada por Protección Física y Cuadros), a esta se le subordinan 9 subdirecciones

La empresa no tiene elaborado un mapa de procesos por lo que no los clasifica atendiendo a las normas vigentes. El trabajo en grupo realizado por (Guilarte,

2015) con especialistas de la entidad y la alta dirección permitió identificar los procesos y clasificarlos como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Procesos identificados en la organización

Estratégicos	Claves	Apoyo
1. Planeación estratégica	4. Extracción de mineral	12. Aseguramiento a la producción (Plantas auxiliares)
2. Gestión de la calidad	5. Preparación de pulpa	13. Actividad económica – financiera
3. Gestión tecnológica	6. Espesado	14. Logística
	7. Lixiviación	15. Mantenimiento
	8. Lavado	16. Gestión de Recursos humanos
	9. Neutralización	17. Servicios ingenieros
	10. Precipitación de sulfuros	18. Gestión jurídica
	11. Secado y envase	

Una vez identificado y clasificado los procesos la autora de la investigación propuso un mapa de procesos para la entidad que se muestra en el Anexo 6.

Paso 2: Definir problema y objetivos del estudio

Al realizarse un análisis de todos los procesos claves con los expertos de la empresa se determinó que en la planta de Lixiviación están existiendo problemas técnicos-operacionales que ponen en peligro el flujo tecnológico de toda la fábrica, uno de ellos es el deterioro del cabezal distribuidor que alimenta de pulpa a los precalentadores de dicha planta procedente de la planta de Espesadores, debido al tiempo prolongado en operaciones y la abrasividad que provoca la arena que trae el mineral, por lo que urge sustituirlo en el menor tiempo posible, pero como antes no se había experimentado un cambio de este tipo no es seguro que se cumpla con el tiempo programado además de que pueden existir irregularidades en el montaje, en este caso puede producirse el paro de la planta trayendo consigo pérdidas a la empresa de alrededor de 2 028 846.60 pesos en USD. Por

lo que se hace necesario encontrar una forma de realizar la reparación de la parte dañada del proceso sin tener que detener la planta. De esta forma queda definido el problema al cual se le dará solución mediante la aplicación del procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos descrito por Aldana Castillo (2016).

Problema: ¿Cómo evaluar alternativas para el funcionamiento de la planta de Lixiviación durante el tiempo de reparación del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores?

Para determinar el alcance del proyecto, este estudio de simulación tiene como objetivos a cumplir:

1. Analizar el rendimiento de la planta de Lixiviación.
2. Simular dos alternativas de solución para la sustitución del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores de la planta de Lixiviación y seleccionar la más viable para su aplicación.

Paso 3: Asegurar implicación y compromiso de la gerencia

Con el objetivo de asegurar el compromiso y la implicación de la gerencia la investigadora se reunió con los responsables del proceso en cuestión donde se le explicó el objetivo general que persigue la investigación y se les hizo conciencia a todos de la necesidad de lograr un comprometimiento total que favorezca el desarrollo del presente estudio.

Paso 4: Creación del grupo de trabajo

Los miembros del equipo de trabajo fueron aprobados en el Consejo de Dirección correspondiente al mes de febrero de 2016. Este grupo está representado por los máximos responsables del proceso, tecnólogos del área de producción, del departamento de tecnología de los procesos y del área de mantenimiento y un mando intermedio, de ellos, cuatro son ingenieros químicos, cuatro son ingenieros mecánicos y un técnico medio con treinta y tres años de experiencia en el proceso de lixiviación, los demás poseen más de diez años de experiencia en trabajos con procesos metalúrgicos. Todos dominan la tecnología de la informática con calidad y destreza de acuerdo a lo que exige el proceso haciendo uso de programas

computacionales para operar, verificar y evaluar todos los procesos de la fábrica. Los miembros del equipo se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Miembros del equipo de trabajo

No	Nombre y Apellidos	Área
1	Alain Borges Reyes	Subdirección de Tecnología
2	José E. López Almira	Subdirección de Tecnología
3	Edel Álvarez Hernández	Subdirección de Tecnología
4	Ariel Mosqueda Martínez	Subdirección de Tecnología
5	Leodán Alcantara Tamayo	Subdirección de Producción
6	Fernando de la Vara Garrido	Subdirección de Producción
7	Ramón García Batista	Subdirección de Producción
8	Oney Correa Borges	Subdirección de Producción
9	Héctor Manuel Linares	Subdirección de Mantenimiento

Una vez creado el grupo de trabajo se realizó una reunión de preparación donde hubo un intercambio de información con la finalidad de que los expertos del proceso orientaran a la investigadora y a los menos involucrados en el proceso sobre el funcionamiento de la planta de Lixiviación, el estado actual del sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores de dicha planta además de las diferentes alternativas que se tienen para darle solución al problema que se está generando, de esta misma forma la analista explicó brevemente a todos los presentes en lo que consistía el procedimiento para la simulación computacional que se deseaba aplicar al proceso de lixiviación específicamente al sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores.

Paso 5: Analizar y describir del proceso

Tarea 1: Determinar responsable(s) y objetivos del proceso

La fábrica Pedro Sotto Alba opera bajo una tecnología que la hace única de su tipo en el mundo llamada lixiviación ácida a presión, esta a su vez es el proceso más complejo de todo el flujo tecnológico por su forma de operación. Tiene como objetivo la separación de níquel más cobalto de otros minerales como aluminio,

magnesio, hierro, silicio, etc., bajo condiciones específicas y apropiadas como son: temperatura, presión y otros factores que influyen y que determinan al mismo, los cuales son llevados a cabo en un sistema de reactores. El máximo responsable de este proceso es el jefe del complejo Lixiviación-Lavaderos junto al jefe de operaciones y el jefe de mantenimiento de este mismo complejo.

Tarea 2: Descripción verbal del proceso

El flujo tecnológico del proceso de lixiviación inicia con la pulpa, que con un 45 a 48% de sólido y 28°C de temperatura es bombeada desde la planta de espesadores a través de una de las dos líneas disponibles, hacia los precalentadores de mineral. Allí se introduce la pulpa y se precalienta hasta 82°C por contacto directo con vapor de 15 Lb/pulg² a contracorriente y se distribuye en todas las secciones lográndose de esta manera una mayor superficie de contacto entre la pulpa y el vapor. Una vez precalentada se descarga por el fondo a los tanques de almacenaje donde se mantiene homogeneizada por medio de un sistema de agitadores mecánicos. De los tanques de almacenaje la pulpa mediante bombas centrífugas es enviada a la succión de bombas de alimentación de alta presión (Wirth) las que suministran mineral a los calentadores de cada tren. En los calentadores la pulpa alcanza una temperatura de 246°C mediante la inyección de vapor de 650 Lb/pulg² a contracorriente que proviene del exceso de los reactores y un cabezal común de la termoeléctrica. Después de calentada la pulpa adquiere la temperatura y presión requeridas para ser alimentadas a los rectores. La pulpa fluye por gravedad al reactor A en el que se le inyecta ácido sulfúrico concentrado, por reboso fluye al B, luego al C y por último al reactor D ocurriendo en ello el proceso de lixiviación. Para garantizar una buena lixiviación es necesario obtener una mezcla adecuada entre pulpa y ácido, esto se obtiene mediante la inyección de 650 Lb/pulg² a través de los tubos centrales de agitación, al llegar a la parte superior del reactor el vapor se separa de la pulpa y a través del tubo de vapor de exceso pasa al calentador donde se utiliza para el calentamiento de la pulpa. La pulpa lixiviada fluye por gravedad del reactor D a los dos enfriadores con que cuenta cada tren en los que se reduce la temperatura de la pulpa hasta 130°C, al pasar por dentro de la calandria esta cede su calor al agua

que rodea los tubos produciéndose de esta manera vapor de 15 Lb/pulg² utilizándose para precalentar la pulpa a lixiviar y en la precipitación del licor producto en la planta de sulfuros. La última operación consiste en disminuir la presión a la pulpa a lixiviar, para lograr dicho propósito cada tren está provisto de dos tanques despresurizadores (Flashtank) donde la pulpa entra por la parte superior a través de unos estranguladores de cerámica de 23.5 mm de diámetro los continuos y de 13 mm de diámetro los intermitentes. La operación de despresurización consiste en pasar la pulpa a través de un orificio de pequeñas dimensiones donde se produce un aumento de la velocidad y seguidamente se obtiene una gran expansión, al producirse la expansión se libera presión debido a que la temperatura de la pulpa es de 130°C, la pulpa una vez despresurizada pasa a la caja distribuidora donde puede ser desviada a cualquiera de las dos líneas de transferencia y por ellas a la sección de lavaderos. El vapor de 0 Lb obtenido durante la despresurización pasa a los separadores ciclónicos en los que son eliminadas las partículas de pulpa que puede haber arrastrado el vapor, este vapor se utiliza para precalentar el licor producto que se envía a la planta de precipitación de sulfuros y el resto es liberado a la atmósfera. El licor producto precalentado pasa a un tanque de almacenaje y de aquí es bombeado a la planta de precipitación de sulfuros. Para que ocurra la lixiviación es indispensable el reactivo químico sin el cual no puede existir la misma, para este fin se emplea el ácido sulfúrico a 98% de pureza el que se recibe por gravedad de la planta de ácido y se bombea al rector A mediante las bombas Lewa. (Ver Anexo 5)

Paso 6. Evaluar y seleccionar la tecnología de simulación

Para el estudio de la simulación existen un sin número de paquetes de software que permitirán al analista simular cualquier sistema real por muy complejo que parezca, pero al hacer un análisis de las características que tienen los más utilizados para estos casos (Ver anexo 7) la autora de la presente investigación escoge para su uso el paquete de software Arena ya que es uno de los más completos y ajustado al perfil de la modelación por diagramas de flujos. Este software puede simular servicios, fabricación, transformación, logística, cadenas de suministros, etc.

2.2 Etapa II: Modelado y experimentación

Paso 7: Analizar el sistema

Tarea 1: Definir el sistema y objetivos del modelo

Para el logro de los objetivos anteriormente expuestos se hace necesaria la delimitación del proceso de lixiviación ya que está contenido por varios subprocesos pero como el interés de la autora se centra en el sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores de la planta de Lixiviación se selecciona este subproceso como objeto de estudio, es decir desde que la pulpa procedente de la planta de Espesadores llega al cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores de Lixiviación hasta que pasa precalentada, por gravedad, a los tanques de almacenaje.

Teniendo en cuenta tanto la problemática definida como los resultados que se desean alcanzar, la confección de los modelos tiene como objetivos lograr para el lector una mayor comprensión del sistema y las alternativas de solución que se tienen para la continuidad del proceso en el momento de la reparación, además de facilitar la simulación en el software Arena.

Tarea 2. Modelado del sistema

El flujo de alimentación de pulpa a la planta de Lixiviación entra a la misma por dos líneas de acero al carbono, una de 20 pulgadas de diámetro asistida por dos bombas centrífugas ubicadas en la planta de Espesadores de pulpa, y la otra de 18 pulgada de diámetro asistida por dos bombas reforzadoras que operan en área de la planta de Lixiviación. Estas alimentan directamente a tres precalentadores (HE) donde el flujo entra en cada uno de ellos por sus partes superiores e intercambian calor por contacto directo de vapor de 15 Lb/pulg² con el mineral lográndose una temperatura entre 180 y 195 °F. El flujo de vapor a estos recipientes está regulado por válvulas automáticas que operan en función del flujo de pulpa alimentada. Finalmente el mineral precalentado es enviado por gravedad a tres tanques de almacenamiento (TK) de acero al carbono, provisto de agitación mecánica con capacidad cada uno para 150 000 galones. Los flujos de alimentación de pulpa están en dependencia de la capacidad en la que se esté operando. El estado actual de este sistema se muestra en la figura 2.2.

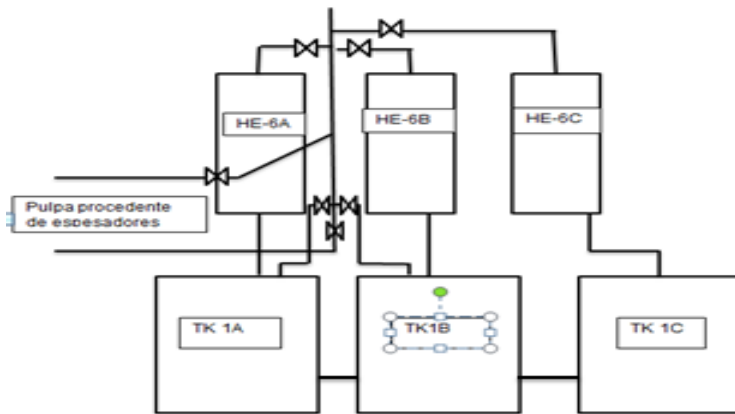


Figura 2.2 Sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores

Fuente: Elaboración propia

El cambio del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores de la planta de Lixiviación es una tarea que debe ejecutarse con urgencia ya que debido a el deterioro puede provocar una avería de gran magnitud y afectar considerablemente el proceso influyendo en la producción de la planta y toda la fábrica. Esta operación debe mantener la planta trabajando aunque haya que disminuir la capacidad de la misma a un nivel permisible para el proceso pero como anteriormente no se había realizado un cambio de este tipo (en operaciones) no es seguro que se cumpla con el tiempo programado para la sustitución ya que pueden presentarse imprecisiones con los diámetros de tuberías, con el izaje y montaje de la pieza, etc. y esta es una pieza que debe montarse con exactitud porque de ella depende el funcionamiento de los precalentadores.

Para darle solución a este problema la autora se reunió con uno de los jefes de turno de la planta y miembro del grupo de trabajo creado para esta investigación con el objetivo de analizar dos alternativas que se tenían para la sustitución del cabezal distribuidor que fueron aprobadas por los tecnólogos del departamento de tecnología de los procesos que atienden esta planta.

Es importante señalar que para ejecutar cualquiera de las dos alternativas la capacidad de la planta se debe bajar al 75% y que el análisis se hizo para 4 horas de montaje.

Primera Alternativa:

Montar una línea de acero al carbono de 10 pulgadas y 7 metros de largo desde la línea de 20 pulgadas que viene de la planta de Espesadores hasta la línea que sale del cabezal distribuidor para el primer precalentador (figura 2.3). Con esta alternativa estará trabajando solo el primer precalentador con el 50% del flujo original de esa línea para luego pasar esa pulpa precalentada a 180 y 195 °F al primer tanque de almacenamiento de pulpa precalentada y este alimentar a los otros dos tanques a través de la interconexión que poseen entre ellos.

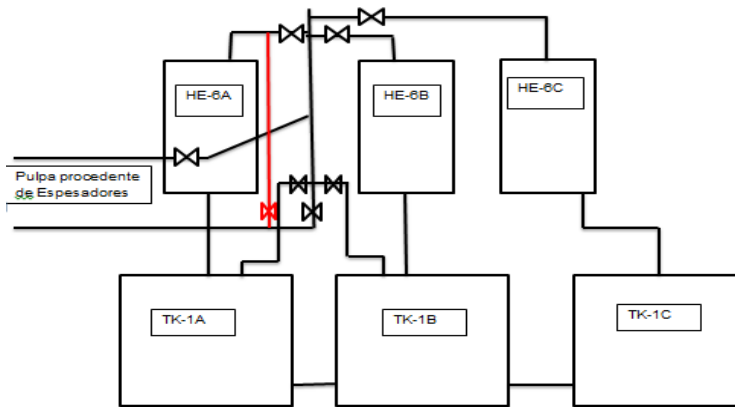


Figura 2.3 Primera modificación del sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores.

Para realizar esta modificación se necesitan una serie de piezas y materiales además de la participación de la fuerza laboral que a continuación se mencionarán:

- 1 línea de acero al carbono de 10 pulgadas y alrededor de 7 metros de largo
- 3 platillos o bridas de 10 pulgadas
- 1 válvula de mariposa 10 pulgadas
- 1 platillo ciego en la línea de desahogo del precalentadora al que se conecte
- 2 juntas
- Un paillero, dos soldadores, un gruero, tres instaladores de tubería gruesa

Todos estos materiales tienen un costo que se lleva en cada centro de costo y cada área tiene su centro de costo, en este caso el área encargada de realizar este trabajo es mantenimiento. Al analizar con especialistas el costo que va a

generar la realización de esta alternativa se obtuvo lo que se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Costos por materiales y mano de obra

Materiales	Cantidad	Costo unitario(\$/u)	Costo (\$)
Línea de acero al carbono	7 metros	104.2244	764.5708
Platillos o bridas de 10 pulgadas	3	69.8451	209.5353
Válvula de mariposa de 10 pulgadas	1	1483.4042	1483.4042
Platillo ciego	1	68.4878	68.4878
Juntas	2	5.2992	10.5984
Mano de Obra	7		341.96
Total			2 878.55

Ventaja: Se mantiene el precalentamiento de la pulpa lo que ahorraría más energía de vapor.

Desventaja: Mayor retención de flujo de pulpa durante el intercambio con el vapor que lo precalienta.

Segunda Alternativa:

La segunda alternativa consiste en conectar una línea de 10 pulgadas de diámetro y 3.5 metros de longitud desde la línea de alimentación de pulpa de 18 pulgadas de diámetro que viene de la planta de Espesadores hasta unirla con otra que sale de la línea del cabezal distribuidor que baja hacia el primer tanque de almacenamiento entrando sin precalentar a 28°C de temperatura y alimentando a

los demás tanques. Con esta alternativa se prevee que entre al tanque el 60% del flujo original. (Ver figura 2.4)

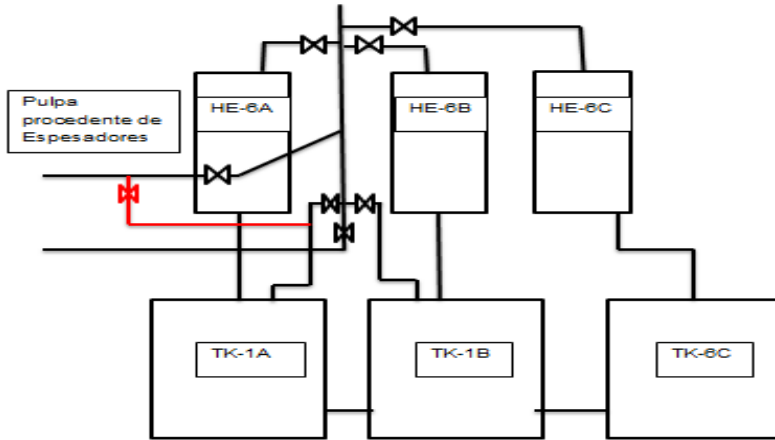


Figura 2.4 Segunda modificación del sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores.

Para realizar esta modificación se necesitan una serie de piezas y materiales además de la participación de la fuerza laboral que a continuación se mencionarán:

- 1 línea de acero al carbono de 10 pulgadas y alrededor de 3.5 metros de largo
- 3 platillos o bridas de 10 pulgadas
- 1 válvula de mariposa 10 pulgadas
- 1 mocheta de 10 pulgadas de entre 15 y 20 cm de largo
- 2 juntas
- Un pailero, dos soldadores, un gruero, tres instaladores de tubería gruesa

Los costos asociados a esta alternativa se muestran a continuación en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Costos por materiales y mano de obra

Materiales	Cantidad	Costo unitario(\$/u)	Costo (\$)
Línea de acero al	3.5 metros	104.2244	364.7854

carbono			
Platillos o bridas de 10 pulgadas	3	69.8451	209.5353
Válvula de mariposa de 10 pulgadas	1	1483.4042	1483.4042
Mocheta de 10 pulgadas (15-20 cm)	1	0	0
Juntas	2	5.2992	10.5984
Mano de Obra	7		341.96
Total			2 410.28

Ventaja: El flujo no ofrece ninguna retención antes de incorporarse al tanque de almacenaje por lo que es posible alcanzar o mantener el nivel de estos recipientes con mayor eficacia

Desventaja: El mineral al no ser precalentado consume mayor cantidad de energía al llegar al calentador.

Actividad 1: Representación del sistema

Para realizar los modelos se utilizó el software Arena seleccionado para el estudio de la simulación ya que este incluye las herramientas necesarias para diagramar el sistema de interés. Las figuras 2.5 y 2.6 muestran los modelos de la planta de Lixiviación y del sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores respectivamente.

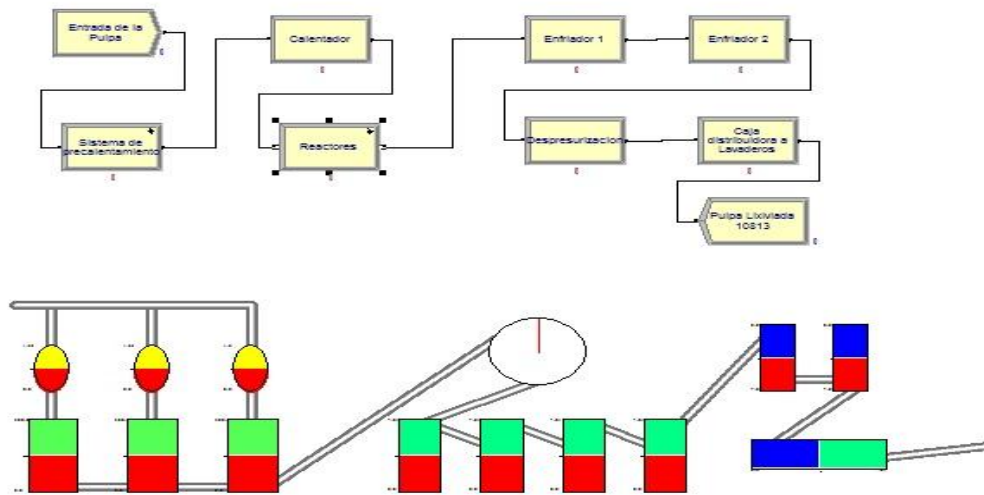


Figura 2.5 Modelo del flujo de la planta de Lixiviación

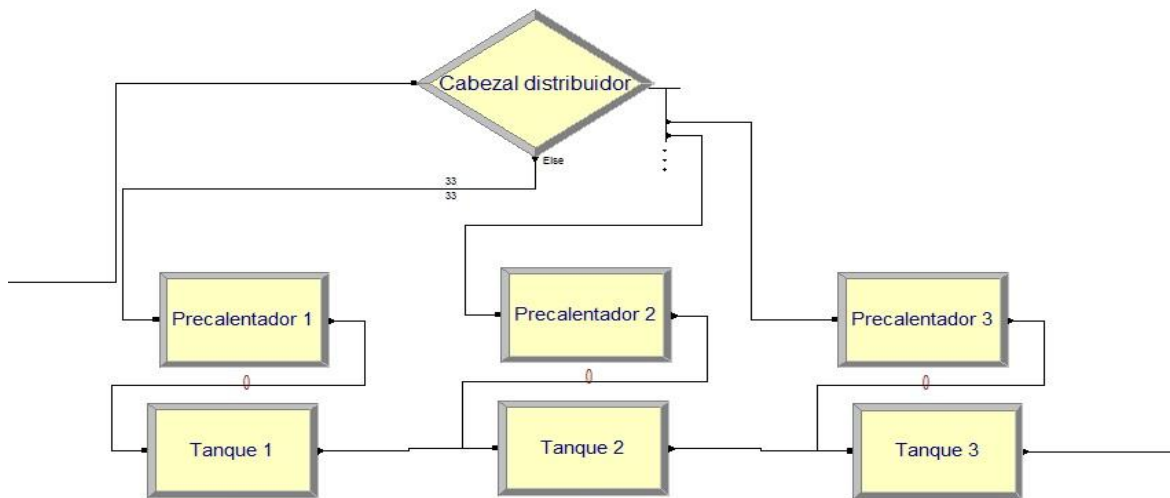


Figura 2.6 Modelo del sistema de alimentación de pulpa a los precalentadores

Actividad 2: Identificar y seleccionar las variables más relevantes

El trabajo con los expertos permitió determinar las variables más relevantes del proceso y de esta misma forma se recolectaron los datos que para este caso fue el valor del flujo para cada subproceso. Los valores de los flujos son iguales ya que la fábrica opera bajo procesamiento continuo, tomándose una media de este valor ya que es imposible fijar un valor porque el flujo de la planta depende de la capacidad en la que se esté operando que no siempre es la misma.

Las variables se muestran a continuación en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Variables más relevantes del proceso

VARIABLES	Valores (galones/min)
Flujo de pulpa lixiviada que sale a lavaderos	2435
Flujo de pulpa desde tanques hasta a calentador	2435
Flujo de pulpa desde calentador hasta reactor	2435
Flujo de los reactores a los enfriadores	2435
Flujo de los enfriadores a los despresurizadores	2435
Flujo de pulpa de un reactor a otro	2435

Paso 8: Validar el modelo

Específicamente para verificar si el software funcionaba adecuadamente y validar si el modelo era una representación apropiada del sistema real, se ejecutaron corridas piloto donde se fueron haciendo los ajustes necesarios hasta lograr el ajuste correcto del modelo, luego se comprobó que el modelo opera de la forma en que opera el sistema real, es decir el resultado arrojado (flujo) por el software es muy similar a la cantidad de mineral que se procesa en la planta de Lixiviación, además de que los expertos en el proceso estuvieron de acuerdo con estos resultados, así de esta forma quedó validado el sistema.

Paso 9: Experimentar

Una vez verificado el modelo se ejecuta la simulación en el software escogido, para ello se realizó el cálculo del número de corridas que se determinó mediante la lógica de pasos propuesta por Chung (2004) (Anexo 8), se ejecutaron diez corridas y como el error fue menor al 10% pues la cantidad de corridas óptimas es de diez. Se simuló para un solo tren todo el proceso en su estado actual, desde que entra el mineral al cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores hasta que sale a la caja distribuidora que suministra mineral a la planta de Lavaderos, por cuestiones de procesamiento en el software se llevó los valores de flujo a una escala de 250,27 galones/unidad, en este caso entra a un tren 2882 unidades/día saliendo de este 2802 unidades/día (Anexo 9), lo que equivaldría a 701 256,54

galones/día teniendo en cuenta la escala, y al comparar este valor con el sistema real que procesa 701 280 galones/día cada tren se puede observar que la diferencia no es muy significativa por lo que el grupo de trabajo estuvo de acuerdo con el modelado y los resultados arrojados por el software. Luego se simuló el proceso con el montaje de la primera alternativa (Anexo 10) que debido a la diferencia de diámetros de las tuberías debe salir un 50% del flujo original, siendo el resultado en el software de 349 877,46 galones/día y posteriormente se realizó la simulación del proceso con la segunda alternativa (Anexo 11) con un 60% aproximadamente del flujo original siendo el galonaje resultante de 420 453,60 galones/día. Como se demuestra anteriormente las dos alternativas figuran ser viables pues cumplen con el porcentaje que se estimaba y lo que es más importante, la planta continúa su procesamiento de mineral, no con el flujo que se exige pero no se detiene el proceso y por tanto no se generan pérdidas y como estas modificaciones sólo son alternativas para la sustitución del cabezal distribuidor de pulpa cuando la planta retorne a su condición normal se puede recuperar todo el galonaje de mineral que se dejó de producir y por ende el plan de producción mensual no se afecta.

2.3 Etapa III: Control y mejora

Paso 10. Analizar resultados

Como el objetivo de la simulación es seleccionar una alternativa para la continuidad del proceso en el momento de la sustitución del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores de la planta de Lixiviación, es válido realizar una comparación entre ellas teniendo en cuenta el costo de las mismas, pero como la necesidad de la planta se centra en lograr un mayor caudal de flujo en ese período, pues se toma esta variable como referencia para la comparación. Con la primera alternativa según el software, se procesan 349 877,46 galones/día por cada tren teniendo un costo por gastos de materiales en la implementación de la alternativa de 2 878.55 pesos en USD; posee como ventaja, que precalienta el mineral ahorrando energía de vapor de 650 lb más adelante en los calentadores pero ofrece mayor retención del flujo al tener que precalentar con un solo precalentador, por lo que existen demoras al alimentar los tanques de

almacenaje. Con la segunda alternativa según el software se procesan 420 453.60 galones/día y tiene un costo por gastos de materiales en la implementación de la alternativa de 2 410.28 pesos en USD, posee como ventaja que no ofrece ninguna retención del flujo porque la pulpa pasa directo al primer tanque de almacenaje sin tener que precalentar, pero por esta misma causa incurre en mayores gastos de vapor de 650 lb más adelante en los calentadores. Al comparar ambas alternativas la segunda posee ventaja sobre la primera por ser menos costosa y por ofrecer mayor caudal de flujo, además según los operarios del proceso es más conveniente esta alternativa pues la línea de 18 pulgadas de donde sale esta modificación es controlada por los mismos mediante dos bombas reforzadoras que operan en esta área y esto les permite tener un mayor control de la pulpa. Por estas razones se selecciona la segunda alternativa para su aplicación en la planta de Lixiviación y efectuar la sustitución del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores de dicha planta.

Valoración económica - social

Al evaluar el resultado obtenido en la investigación, se puede plantear que el mismo puede reportar impactos económicos y sociales.

En cuanto a lo económico:

- ❖ La modificación para la sustitución del cabezal distribuidor de pulpa de la planta de Lixiviación de la empresa mixta Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A que se propone en esta investigación permitirá evitar pérdidas a la empresa y al país de 2 028 846 pesos en USD provocadas por una posible avería de dicho cabezal y por consiguiente el detenimiento del proceso.

Desde el punto de vista social:

- ❖ La alternativa para la continuidad del proceso en el momento de la sustitución del cabezal común preverá una avería de gran magnitud que ponga en peligro la vida de los trabajadores.

Conclusiones

El resultado de esta investigación permitió arribar a las conclusiones siguientes:

1. Se confeccionó el marco teórico-práctico referencial mediante la revisión bibliográfica que permitió demostrar que la simulación es una poderosa herramienta para la toma de decisiones y comprender la necesidad de realizar la sustitución del cabezal distribuidor que alimenta de pulpa a los precalentadores de la planta de Lixiviación sin que se detenga el proceso.
2. Se aplicó el procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos propuesto por Aldana Castillo (2016) con el cual se evaluaron dos alternativas para la sustitución del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores de la planta Lixiviación sin afectar el proceso.
3. Se seleccionó el software Arena para la simulación computacional de la planta de Lixiviación y las dos alternativas de solución por ser este uno de los más completos y ajustado al perfil de la modelación por diagramas de flujos.
4. Se compararon las dos alternativas teniendo en cuenta los resultados arrojados por el software seleccionándose la segunda alternativa como la más viable para aplicarla al proceso de lixiviación.

Recomendaciones

1. Implementar en la planta de Lixiviación la alternativa escogida como resultado de la aplicación del procedimiento propuesto por Aldana Castillo (2016) para el cambio del cabezal distribuidor de pulpa a los precalentadores.
2. Valorar la aplicación del procedimiento en otras empresas de producción realizándole las adecuaciones pertinentes a partir de las características específicas del proceso de que se trate.
3. Socializar los resultados de la presente investigación de manera que sirva de material de estudio y fuente bibliográfica para futuras investigaciones sobre el tema.

Bibliografía

1. *Sitio web de: Lander Simulation & Training Solutions S.A.* (2014). Recuperado el 9 de Febrero de 2016, de <http://www.landersimulation.com/formacion-con-simulacion/el-mundo-en-movimiento/historia-de-la-simulacion/index.php>
2. Alberto Medina, D. N. (2010). Relevancia de la Gestión por Proceso en la Planificación Estratégica y la Mejora Continua. *Eidos*.
3. Amozarrain. (1999). *La gestión por proceso*. España: Mandragón Corporación Cooperativa.
4. Aracil, J. (1995). *Dinámica de sistemas*. Madrid: Isdefe.
5. Armengot, J. (2012). Orígenes y Desarrollo de la minería. 19.
6. Arosemena, C. T. (Abril de 2013). <http://formared.blogspot.com/>. Recuperado el 23 de Febrero de 2016, de <http://formared.blogspot.com/p/reflexiones-y-articulos-educativos.html>
7. Astorga, E. M. (2015). La industria del níquel en el desarrollo socioeconómico actual. Reflexiones en torno a una política industrial . *Scielo*, 1.
8. Autores, C. d. (2012). La minería en cuba. *Ciencias holguín*, 23.
9. Azarang, M., & García, E. (1996). Simulación y análisis de modelos estocásticos. Mexico: McGraw Hill.
10. Belda, C. F., & Grande, E. U. (2009). Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación. *Encuentros multidisciplinares*, 11(32), 37-48.
11. Cañizares, D. Á., & Ferry, N. C. (2014). Predicción y simulación de las zonas de visibilidad de radar en 3D en el territorio de Cuba. *Revista Telem@tica*, 13(3), 75-85.
12. Cartier, E. N. (2002). *¿Como enseñar a determinar costos? Un problema no resuelto*.
13. Caselles, A. (1993). Systems Decomposition and coupling. *Cybernetics and Systems: An International journal*.

14. Caselles, A. (1994). Improvements in the Systems Based Program Generator SIGEM. *Ciberneticas and Systems: An International journal*(25), págs. 81-103.
15. Champagnat, U. d. (3 de julio de 2014). *Creatividad e innovación trabajo en equipo: Gestipolis*. Recuperado el 7 de marzo de 2016, de Gestipolis: <http://www.gestipolis.com/brainstorming-lluvia-o-tormenta-de-ideas/autores>
16. Chung, C. A. (2004). *Simulation Modeling. Handbook. A Practical Approach*. New York: CRC Press.
17. Cid, G., López, T., González, F., Herrera, J., & Ruiz, M. E. (2011). Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2), 42-46.
18. Confederación Granadina de Empresarios. (s.f.). www.cge.es/portalcge. Recuperado el 7 de Marzo de 2016, de <http://www.cge.es/portalcge/tecnologia/innovacion/4111benchmarking.aspx>
19. Consultores, A. (2013). *Gráfico de Control-Herramientas de la calidad*. Recuperado el 7 de marzo de 2016, de <http://www.aiteco.com/herramientas-y-métodos-de-mejora/gráficos-de-control/>
20. Consultores, A. (febrero de 2016). *Diagrama de afinidades*. Recuperado el marzo de 2016, de <http://www.aiteco.com/diagrama-de-afinidad/>
21. Cruz, A. S., Gonzáles, O. L., Domínguez, E. S., & Fernández, M. d. (2007). Análisis del comportamiento del parámetro nivel de licor, a través de la modelación matemática y simulación. *Ciencias Holguín*.
22. Cruz, A. S., Ramírez, E. L., Martínez, M. S., Guerrero, Y. F., & González, H. H. (2006). Modelación matemática y simulación del parámetro temperatura de trabajo en el proceso de precipitación de sulfuros a partir del licor de desecho WL. *Tecnología Química*, XXVI(2), 22-28.
23. De la Figal, J. G. (2011). Simulación de antorcha de plasma. *Revista Cubana de Ingeniería*, 1(3), 25-30.

24. Delgado, K., & Mejía, M. (2011). Aplicación de la simulación discreta para proponer mejoras en los procesos de atención en el área de emergencia de un hospital público. *Industrial Data*, 14(1), 47–54.
25. Díaz, R. E. (2013). El níquel cubano ¿Dónde va a parar su ganancia? *Instituto para la Educación del Libre Pensamiento*, 2.
26. Empresas, G. d. (25 de mayo de 2012). *Tipos de procesos de la producción*. Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.quiminet.com/empresas/tipos-de-procesos-de-la-produccion-2746373.htm>
27. García, C., & Martínez, R. (1996). El debate investigación cualitativa frente a la investigación cuantitativa. *Enfermería clínica*, 6(5), 213.
28. Giaglis, G., Paul, R. J., & Hlupic, V. (June de 1998). Simulation modeling of business processes. (A. D.-N. D., Ed.) *In Proceedings of the 3rd UK Academy of Information Systems Conference*, 311-320.
29. Gras, J. C. (Agosto de 2012). *horizontesbpm.blog.com*. Recuperado el 1 de Marzo de 2016, de <http://horizontesbpm.blog.com/?tag=mineria-de-proceso>
30. Grau, S. P. (s.f.). Recuperado el 17 de Febrero de 2016, de Monografías.com S.A: <http://www.monografias.com/trabajos82/disenoprocesos-productivos/disenoprocesos-productivos2.shtml#ixzz3zbiWCIm9>
31. Guasch, A., Pera, M., Casanovas, J., & Figueras, J. (2003). *Modelado y Simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.
32. Guilarte, R. R. (2015). Tesis de diplomado . *Procedimiento para el diagnóstico, proyección y control de la Gestión de Capital* . Holguín, Holguín, Cuba.
33. Halliburton, E. (2006). *Manual para el análisis, evaluación y reingeniería de procesos en la Administración Pública* (Tercera ed.). Buenos Aires, Argentina: Publicación de la Subsecretaría de la Gestión Pública y del Proyecto de Modernización del Estado BIRF 4423-AR.
34. Hechavarría, H. C. (1 de Diciembre de 2015). Importantes inversiones respaldan producción de níquel en Holguín. *Juventud Rebelde*.

35. Hernandez, C. H. (2009). La Evaluación cualitativa y cuantitativa. Armenia, Colombia: Disponible en <http://wlwchhh.blogspot.com/2009/04/la-evaluacion-cuantitativa-y.html>.
36. Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Scielo*, 30(1).
37. <https://answers.yahoo.com/>. (s.f.). Recuperado el 13 de Febrero de 2016, de https://mx.search.yahoo.com/search?p=evaluacion+de+flujos+productivos&r=uh3_answers_web_gs
38. Law, A. (2006). *Simulation Modeling & Analysis with expertfit software* (Cuarta ed.). Mc Graw Hill International.
39. Law, A. M., & Kelton, D. (1991). *Simulation Modeling & Analysis* (Segunda ed.). New York: McGraw Hill.
40. Law, A. M., & Kelton, D. (2000). *Simulation Modeling & Analysis* (Tercera ed.). Tucson, Arizona: McGraw Hill.
41. Manual de Operaciones de Lixiviación. (s.f.).
42. Marzal, A. E., & Silva, F. R. (2010). *Epopeya del níquel en Cuba*. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales.
43. Medeiros, D. A. (30 de Junio de 2008). Minería de procesos. Más allá de la minería de procesos. (R. S. P., Entrevistador) Santiago.
44. Medina, A., Nogueira, D., Hernández, A., & Viteri, J. (Febrero de 2010). Relevancia de la Gestión por Procesos en la planificación estratégica y la mejora continua. *Revista Eídos*(2).
45. Moncho, A. C. (2008). Modelización y simulación de sistemas complejos. (Edición Digital). Entre Ríos, Argentina.
46. Munain, C. V., & Saiegg, C. A. (2005). *Uso de la Simulación como estrategia de mejora en el proceso de enseñanza-aprendizaje en las universidades. Una aplicación para la carrera de informática*. Tesina, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de Ingeniería, Trelew.

47. Río, D. G., García, C., Misa Llorca, R., & Columbié Navarro, Á. O. (2000). Modelación y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco con minerales lateríticos cubanos. *Minería & Geología*, 2(17).
48. Ríos, I. (2008). *Simulación. Métodos y aplicaciones*. España: Editorial RAMA S.A.
49. Rojo, A. (5 de agosto de 2015). *Diagrama de afinidades: la expresión gráfica de las conexiones*. Recuperado el 7 de marzo de 2016, de Consultora de Sistemas de Gestión y Normas ISO: <http://www.s bqconsultores.es/wp-content/uploads/2015/08/diagrama-de-interrelaciones-SBQ-Consultores>
50. Scenna, N. J. (1999). Simulación de Procesos Químicos. En N. S. col., *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos* (págs. 191-212).
51. Torres, V., & Ortiz, J. (2005). Aplicaciones de la modelación y simulación a la producción y alimentación de animales de granjas. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 39(Número especial), 397-406.
52. Zaratiegui, J. R. (1999). La gestión por procesos: su papel e importancia en la empresa. *Economía Industrial*, VI(330), 82-88.

ANEXOS

The page features a light beige background with a subtle grid pattern. At the bottom, there are several overlapping, wavy, horizontal bands in various shades of beige and cream, creating a decorative, layered effect.

Anexo 1. Resumen comparativo de los procedimientos para la simulación computacional

Himmelblau & Bischoff (1973)	Law & Kelton (1991)	Aracil (1995)	Azarang & García (1996)	Banks et al. (1996)
Formulación del problema y establecimiento de objetivos y criterios; delineación de las necesidades de operación	Formular el problema y el plan de estudio	Definición del problema	Definición del sistema	Formulación del problema
Inspección preliminar y clasificación del proceso			Análisis del sistema	Definición del sistema
Determinación de las relaciones entre los subsistemas				
Análisis de variables y relaciones	Recolectar datos y confeccionar el modelo	Conceptualización del sistema	Formulación del modelo	Formular el modelo
Establecimiento de un modelo matemático		Formalización del modelo		Colección de datos
Evaluación del modelo	Construir el programa de computador y verificar	Comportamiento del modelo	Selección del lenguaje	Implementación del modelo en la computadora
			Codificación del modelo	
Aplicación del modelo; interpretación y comprensión de los resultado	Hacer las corridas piloto y diseño de experimentos	Evaluación del modelo	Experimentación	Verificación
		Explotación del modelo		Validación
	Análisis de resultados	Diseño de experimentos		
	Documentación, presentación e implementación de resultados	Experimentación		
			Implantación, monitoreo y control	Interpretación
				Documentación

Fuente: (Aldana Castillo, 2016)

Anexo 1. Continuación

Barceló (1996)	Giaglis et al. (1999)	Law & Kelton (2000)	Sifuentes et al. (2000)	DoD Modeling & Simulation S.A (2001)
			Comprometerse	
Definir el problema y planificar el estudio	Inicio	Formulación del problema	Definir la naturaleza del problema	Formular el problema
Recogida de datos	Simular	Recolección de datos y definición del sistema a modelar	Investigar y aplicar el conocimiento	Construir el modelo conceptual
Formulación del modelo matemático		Verificar el modelo conceptual	Planear una solución	
Construcción y verificación del modelo para el programa de computadora		Construcción y validación de los programas	Introducir al ordenador la información y ejecutar	Programar el modelo
Pruebas al modelo		Verificación y validación		
Validación				
Diseño de experimentos	Experimentación	Corridas piloto y diseño de experimentos	Reporte de resultados y ajustes precisos	Diseñar, realizar y analizar lo experimentos
Experimentación				
Análisis de resultados		Análisis de resultados		
	Toma de decisiones		Verificar y mirar hacia atrás	Documentación

Fuente: (Aldana Castillo, 2016)

Anexo 1. Continuación

Chung (2004)	Schaffernicht (2006)	Moncho (2008)	Belda & Grande (2009)	Delgado (2011)
			Evaluación y diseño	
Formular el problema	Definir el problema	Descripción del problema	Diseño del proyecto de simulación	Formulación del problema y los objetivos
Planificación del proyecto				
Definición del sistema				
Recolección de datos, análisis y modelación	Elaborar un modelo conceptual	Construcción del modelo	Captura y análisis de datos	Modelado
	Cuantificar o formalizar el modelo		Construcción del modelo	
Transcripción del modelo a la computadora		Programar el modelo en una computadora		Implementación en ordenador
Verificación	Validar el modelo	Calibrado y análisis de sensibilidad	Verificación del modelo	Verificación
Validación		Validación		Validación
Diseño de experimentos	Explotación del modelo	Diseño de experimentos o de pruebas de optimización		Diseño de pruebas piloto
Análisis		Realización de experimentos o de pruebas de optimización		Ejecución de la simulación
Reporte y presentación de resultado		Presentación de resultados		Análisis de resultados
				Documentación
		Toma de decisiones	Medida de logros y mejora continua	

Fuente: (Aldana Castillo, 2016)

Anexo 2. Encuestas para la selección del procedimiento para la simulación computacional de procesos



**FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y TURISMO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Encuesta 1

Estimado trabajador (a):

Con el objetivo de escoger un procedimiento para la simulación de procesos asistida por computadoras que sea de fácil manejo para todos sin tener necesariamente que poseer conocimientos matemáticos, usted ha sido seleccionado como posible experto para ser consultado. Por favor analice cuidadosamente la siguiente pregunta y marque con una X la respuesta que considere adecuada.

¡Muchas gracias por su cooperación!

Departamento al que pertenece: _____

Categoría ocupacional: _____

¿Cuáles son a su juicio los elementos más importantes a tener en cuenta para realizar la simulación de un proceso?

Nro	Elementos	Decisión
1	Caracterizar la organización	
2	Definir problema y objetivos del estudio	
3	Planificación del proyecto	
4	Conceptualización del sistema	
5	Asegurar la implicación y compromiso de la gerencia	
6	Crear el grupo de trabajo	
7	Análisis y descripción del proceso	
8	Definición del sistema	
9	Evaluar y seleccionar la tecnología de simulación	
10	Recogida de datos	
11	Análisis y modelado del sistema	
12	Selección del lenguaje	

13	Verificación y validación del modelo	
14	Programar el modelo en una computadora	
15	Pruebas al modelo	
16	Corridas pilotos y diseño de experimentos	
17	Ejecución de la simulación	
18	Experimentación	
19	Documentación	
20	Análisis y comparación de los resultados	
21	Presentación de los resultados	
22	Toma de decisiones	
23	Medidas de logros y mejoras continuas	
24	Conclusiones del estudio	

¡Muchas gracias!

Anexo 2. Continuación



FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y TURISMO DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Encuesta 2

Estimado trabajador(a):

Con el objetivo de escoger un procedimiento para la simulación de procesos asistida por computadoras que sea de fácil manejo para todos sin tener necesariamente que poseer conocimientos matemáticos, usted ha sido seleccionado como posible experto para ser consultado. De acuerdo a los resultados obtenidos en la encuesta anterior necesitamos que usted de respuesta a la interrogante que a continuación se presenta. Por favor analice cuidadosamente y marque con una X la respuesta que considere adecuada. En el elemento que no esté de acuerdo marque N.

¡Muchas gracias por su cooperación!

Departamento al que pertenece: _____

Categoría ocupacional: _____

¿Está usted de acuerdo en que estos son verdaderamente los elementos más importantes a tener en cuenta para realizar la simulación computacional de un proceso?

Nro	Elementos	Decisión
1	Caracterizar la organización	
2	Definir problema y objetivos del estudio	
3	Asegurar la implicación y compromiso de la gerencia	
4	Crear el grupo de trabajo	
5	Análisis y descripción del proceso	
6	Evaluar y seleccionar la tecnología de simulación	
7	Análisis y modelado del sistema	
8	Verificación y validación del modelo	
9	Pruebas al modelo	
10	Corridas pilotos y diseño de experimentos	
11	Ejecución de la simulación	
12	Experimentación	
13	Análisis y comparación de los resultados	
14	Conclusiones del estudio	



FACULTAD DE INGENERÍA INDUSTRIAL Y TURISMO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Encuesta 3

Estimado trabajador (a):

Con el objetivo de escoger un procedimiento para la simulación de procesos asistida por computadoras que sea de fácil manejo para todos sin tener necesariamente que poseer conocimientos matemáticos, usted ha sido seleccionado como posible experto para ser consultado. A continuación se le mostrará una con los nombres de los procedimientos para la simulación computacional de procesos productivos que contienen los elementos más marcados como resultados de las rondas anteriores, para que usted responda la siguiente interrogante marcando con una x el que crea más aceptable.

¡Muchas gracias por su cooperación!

Departamento al que pertenece: _____

Categoría ocupacional: _____

¿Cuáles de los siguientes procedimientos para la simulación computacional de procesos productivos considera usted que sea un instrumento práctico y comprensible para el diagnóstico y mejora de procesos en las organizaciones?

Nro	Procedimientos	Decisión
1	Law & Kelton (1991)	
2	Barceló (1996)	
3	Law & Kelton (2000)	
4	Chung (2004)	
5	Delgado (2011)	
6	Aldana Castillo (2016)	

Anexo 3. Aplicación de método Delphi para la selección del procedimiento para la simulación computacional de procesos.

La cantidad de expertos depende de la complejidad y las características del trabajo a realizar. El grupo de expertos debe estar entre 7 y 15 para mantener un nivel de confianza y calificación elevado (NC 49:1981 C. Calidad. Métodos de expertos). Para la realización de este estudio se seleccionaron 9 expertos entre directivos, especialistas y tecnólogos de la empresa.

Primera ronda

A cada experto (E) se les envió un correo con la siguiente interrogante: ¿Cuáles son a su juicio los elementos más importantes a tener en cuenta para realizar la simulación de un proceso?

Después de profundizar en las respuestas de los expertos los datos obtenidos fueron procesados y reflejados en la tabla 1.

Tabla 1: Primera propuesta de los elementos más importantes

Elementos	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	CC
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
3		x			x		x			33.33
4	x			x				x	x	44.44
5		x	x	x	x	x	x		x	77.78
6	x	x		x	x		x	x	x	77.78
7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
8			x		x			x		33.33
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
10	x		x		x			x		44.44
11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
12		x							x	22.22
13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
14	x		x		x			x		44.44
15	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
16	x	x		x	x	x	x	x	x	88.88
17	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
18	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
19	x		x					x		33.33
20	x	x	x	x	x		x	x	x	88.88
21	x				x		x			33.33
22	x		x		x		x			44.44
23			x			x				22.22
24		x	x	x	x	x	x	x	x	88.88

El Coeficiente de Concordancia (CC) se calculó según la expresión:

$$C_c = (1 - V_n/V_t) * 100$$

Cc: Coeficiente de concordancia expresado en porcentaje.

Vn: Cantidad de expertos en contra del criterio predominante.

Vt: Cantidad total de expertos.

Empíricamente, si $C_c \geq 75\%$ se considera aceptable la concordancia. Los componentes que obtienen valores de $C_c < 75\%$ se eliminan por baja concordancia o poco consenso entre los expertos.

Segunda ronda

Se le envía a cada experto un correo con la matriz obtenida del paso anterior y la siguiente pregunta: ¿Está usted de acuerdo en que estos son verdaderamente los elementos más importantes a tener en cuenta para realizar la simulación de un proceso? En el elemento que no esté de acuerdo marque N.

Tabla 2: Segunda propuesta de los elementos más importantes

Elementos	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	CC
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
3	N	x	x	x	x	x	x	x	x	88.88
4	x	x	N	x	x	N	x	x	x	77.77
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
10	x	x	N	x	x	x	x	x	x	88.88
11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
13	x	x	x	x	x	N	x	x	x	88.88
14	N	x	x	x	x	x	x	x	x	88.88

Tercera ronda

Se le envía a cada experto un correo con los nombres de los procedimientos para la simulación computacional que contienen los elementos más marcados y la siguiente interrogante:

¿Cuáles de los siguientes procedimientos para la simulación computacional de procesos productivos considera usted que sean un instrumento práctico y comprensible para el diagnóstico y mejora de procesos en las organizaciones?

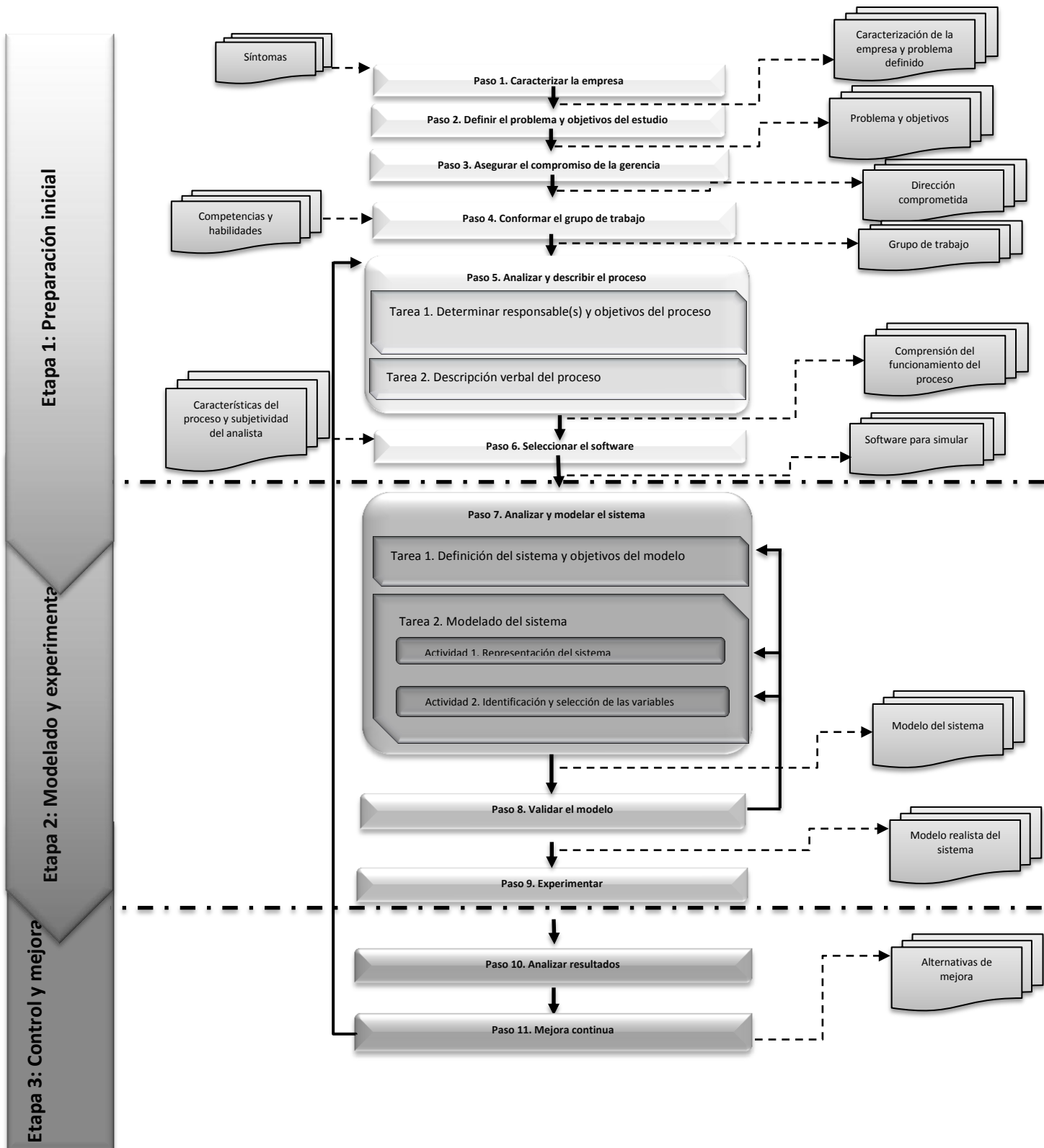
Marque con una x las respuestas que considere aceptable.

Tabla 3. Propuesta de procedimientos para la simulación computacional

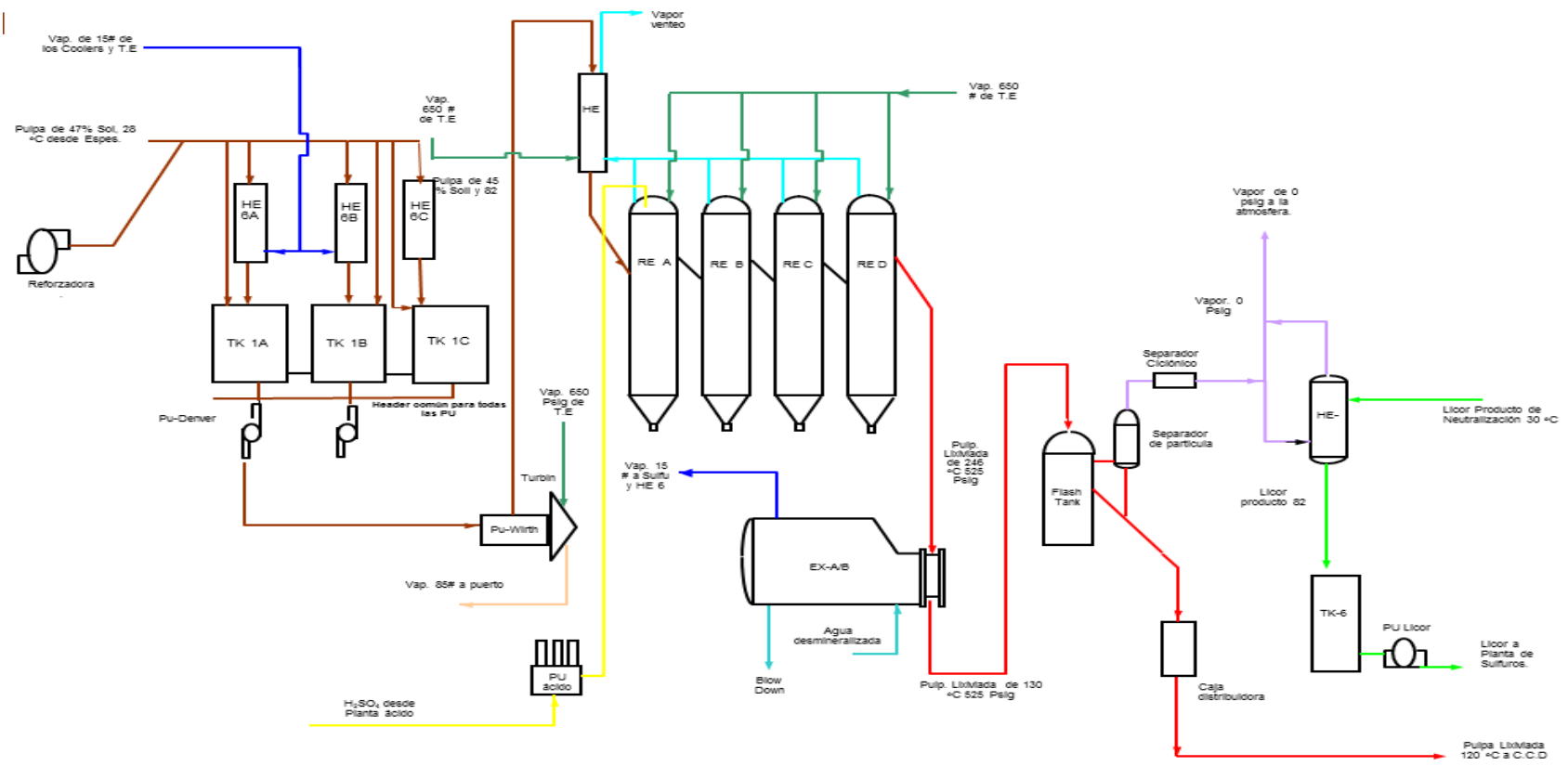
Procedimientos	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	CC
1		x		x						22.22
2	x		x			x		x		44.44
3		x	x	x	x				x	55.55
4				x	x	x	x	x		55.55
5	x	x	x	x			x	x	x	77.77
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100

Se eliminaron los procedimientos que obtuvieron un coeficiente de concordancia menor a 75% y sólo quedaron los procedimientos de Delgado (2011) y de Aldana Castillo (2016) pero como el objetivo del estudio es escoger un procedimiento pues se escoge para aplicar al proceso en cuestión el procedimiento de Aldana Castillo (2016) que obtuvo 100% de concordancia entre los expertos

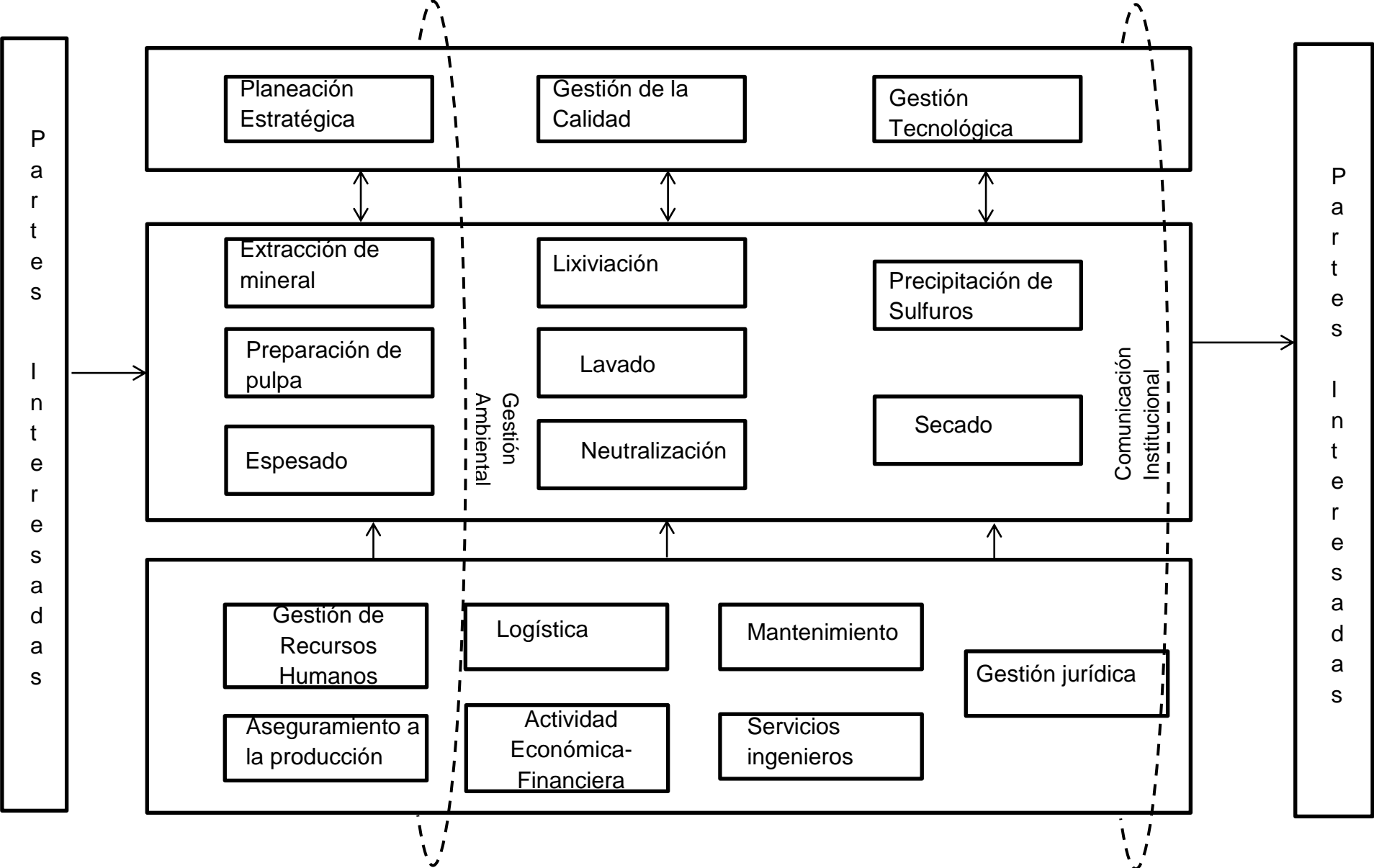
Anexo 4. Procedimiento para la simulación computacional de procesos



Anexo 5. Diagrama de flujo de la planta de Lixiviación



Anexo 6. Mapa de procesos de la empresa mixta Comandante Pedro Sotto Alba



Anexo 7. Comparación entre paquetes de software para simulación

Paquete de software	Orientado a bloques	Sim. continua	Sim. discreta	Permite importar diagramas	Requisitos del sistema	Animación	Depuración de errores	Características	Web
SIMUL8	✓		✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador Intel Core i3 o superior • 1GB libre de memoria RAM. • 170MB libre de espacio en el disco duro • Compatible para versiones de Windows XP, 7, 8, 8.1, 10 			Simulación de cualquier proceso como puede ser una fábrica, un hospital, etc. Una simulación en Simul8 consiste de Objetos (como colas y centros de trabajo) en la pantalla, con una estructura entre ellos e ítems de trabajo.	www.simul8.fr
Process Simulator		✓	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Pentium II 266 o mayor • 64 MB RAM • Acceso a Internet para registro en línea y actualizaciones • Windows XP o mayor • Microsoft Visio 2000 o mayor 	✓		Simula fácilmente diagramas de flujo de Microsoft® Visio®, Mapas de Cadena de Valor, y Diagramas de Flujo. Predice los requerimientos de recursos rápidamente, inversiones de capital, tiempos de proceso, niveles de servicio, etc.	www.simulart.cl/software-de-simulacion/software-process-simulator
Arena	✓	✓	✓		<ul style="list-style-type: none"> • Adobe® Acrobat Reader 9.1.0 o posterior recomendado para 	✓		Está diseñado para ser usado en toda la empresa. Modela ambos simples y complejos procesos y genera estadísticas de producción	www.arenasimulation.com

					<p>documentación de vista.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disco duro con 1 GB de espacio libre en disco (o más). • GB de RAM (o más) • Procesador ® de doble núcleo (o más) de Intel , 3 GHz o más rápido 			<p>muy detalladas. Además, permite las expresiones definidas por el usuario y cuenta con acceso directo de lectura / escritura a los archivos de datos externos. Edición estándar se utiliza en todos los sectores, con mayor frecuencia en la fabricación, la asistencia sanitaria, servicio al cliente, cadena de suministro y transporte / logística</p> <p>Tiene un diseño orientado a objetos y capacidad para ser usado en cualquier área de aplicación.</p>	
MedModel		✓		✓	<ul style="list-style-type: none"> • Intel Core i7/AMD Phenom II o superior • 8 GB RAM • 10 GB espacio libre en disco • DVIHDMI Monitor • DVD ROM • Mouse • Acceso Internet • Solo para ambiente Windows (64 bit) 	✓	✓	<p>Para simular y analizar sistemas de salud en general, de diferentes complejidades y tamaños. Permite replicar hospitales o clínicas de forma real, principalmente a través de diagramas de flujo. El software provee constructores predefinidos especialmente diseñados para replicar el funcionamiento de un sistema por complejo que este sea.</p>	<p>http://www.simulart.cl</p>

Fuente: Aldana Castillo (2016)

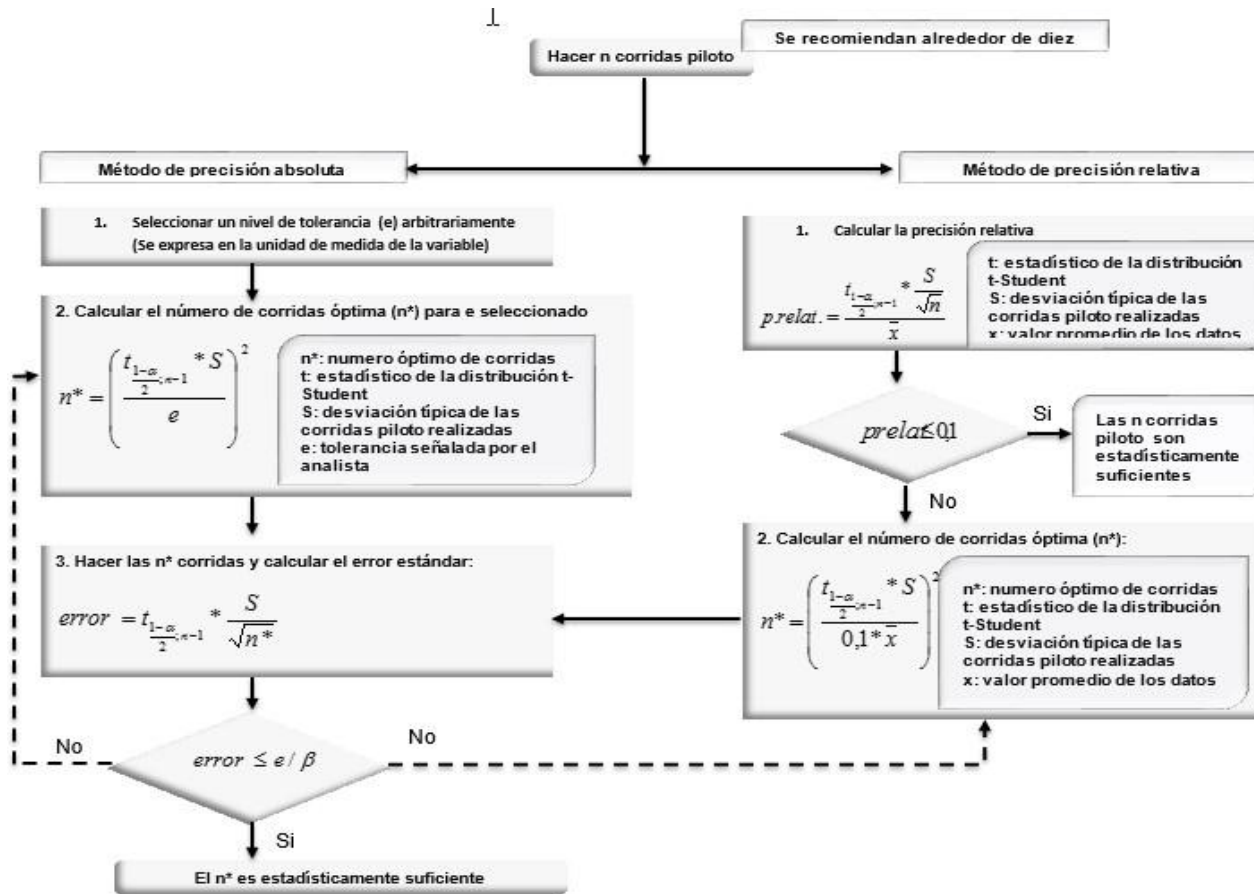
Anexo 7. Comparación entre paquetes de software para simulación (continuación)

Paquete de software	Orientado a bloques	Sim. continua	Sim. discreta	Permite importar diagramas	Requisitos del sistema	Animación	Depuración de errores	Características	Web
ProModel			✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador Intel Core i7/AMD Phenom II o superior • 8 GB RAM • 10 GB espacio libre en disco • DVD ROM • Acceso Internet • Solo para ambiente Windows 	✓		Es un software de simulación de eventos discretos, usado para evaluar, planificar y diseñar trabajo industrial, logística y otras situaciones operacionales y de estrategia. Incluye animación y reportes gráficos. Posee poderosas herramientas para visualización y análisis de las simulaciones	www.promodel.com
Service Modeler		✓			<ul style="list-style-type: none"> • Intel Core i7/AMD Phenom II o superior • 8 GB RAM • 10 GB espacio libre en disco • 512 MB tarjeta de video o RAM compartida • DVI/HDMI Monitor • DVD ROM • Mouse • Acceso Internet • Windows 7 (64 	✓	✓	Permite simular y analizar sistemas de servicio de todo tipo, de diferentes complejidades y tamaños. Todo lo que tiene que hacer es definir como un sistema particular opera, principalmente a través de diagramas de flujo.	www.simulart.cl/software/software-servicemodel

					bit)				
Bizagi Modeler Simulation			✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> •Procesador: 1 (GHz) o superior. 32-bit) o 64-bit •Memoria: 1 (GB) RAM (32-bit) o 2 GB RAM (64-bit) •Disco Duro: 50 MB disponibles de espacio en disco duro •Microsoft Word 2013, 2010, 2007 •Microsoft Visio 2010, 2007, 2003o resolución superior •Windows 10, 8.1, 8, 7, Vista, Server 2012 y2008 			Permite modelar procesos de negocio basado 100% en la notación Business Process Model and Notation (BPMN) y permite simular los procesos de negocio bajo el BPSim (Proceso de Simulación de Negocios) para apoyar la toma de decisiones y aumentar la mejora continua.	www.bizagi.com.es

Fuente: Aldana Castillo (2016)

Anexo 8. Lógica de pasos a seguir para determinar el número de corridas óptima



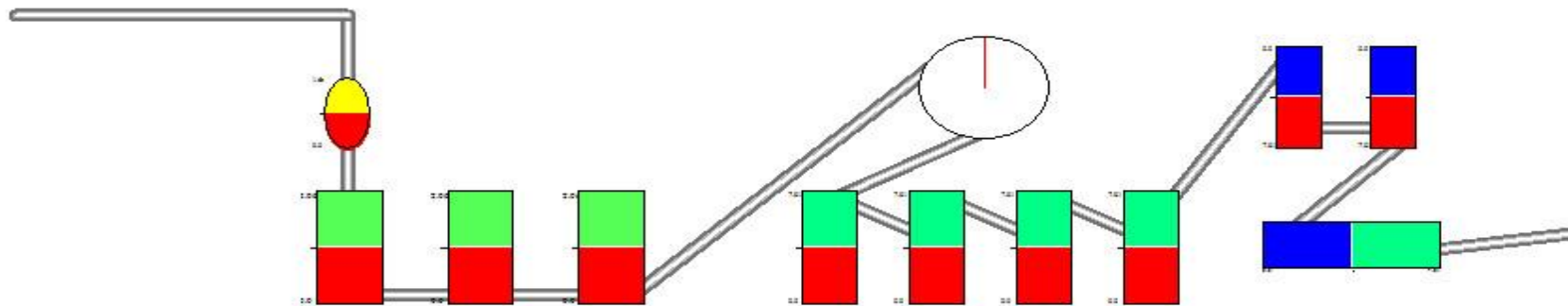
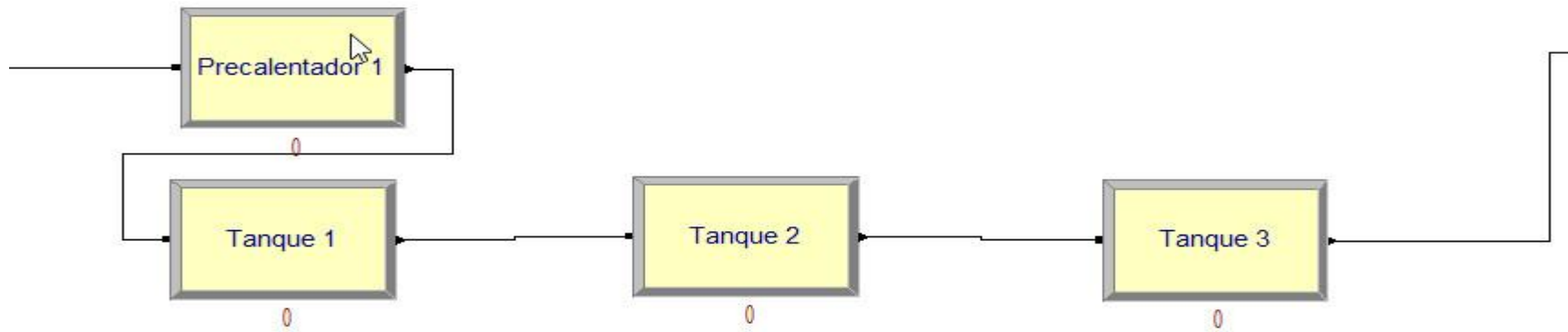
Nota: Cuando en un modelo se evalúan diferentes opciones para el funcionamiento del proceso la metodología anterior se repite para cada alternativa que se vaya a evaluar; finalmente, el número de corridas que se llevará a cabo a cada una de las alternativas será la mayor n* de las calculadas anteriormente.

Anexo 9. Cantidad de unidades diarias de entrada y salida del sistema real.

Other

	Number In	Number Out
Pulpa	2,882	2,802
Total	2,882	2,802

Anexo 10. Modelos de la alternativa 1



Anexo 11. Modelos de la alternativa 2

