Capítulo I: Introducción

* Introducción. Agua como recurso limitado. Problema de los sistemas críticos. Problema del agua como sistema crítico a través de sistemas de sistemas/ciudades inteligentes. Presentación del problema (se dice qué hacer, pero no cómo).
* Antecedentes
* Planteamiento del Problema
* Justificación
* Objetivos
* Metodología

Esta propuesta adopta la metodología de investigación holística, por lo tanto, aunque existan múltiples enfoques de percibir un sistema (mediante herramientas para observar, conocer y entender lo percibido cualitativamente y cuantitativamente), estos más que pensamientos contrarios, se consideran complementarios. De esta forma, en esta propuesta se entiende que la investigación es un proceso continuo y organizado el cual pretende conocer algún evento (característica, proceso o situación) y obtener respuestas a una necesidad (Hurtado, 2012).

* Estructura del Documento

Capítulo II: Marco Teórico

* Ciudades Inteligentes
* Industria 4.0
  + SCF
  + IIoT
  + Manufactura Inteligente
  + Analítica de datos
* I4.0: Gemelo Digital
* Planteamiento del gemelo digital en manufactura
* Proceso de cómo construir un Gemelo Digital
* Modelo de conocimiento
* Modelo formal híbrido
* Sistemas holónicos (Visión del proyecto)
* WSS (Sistemas de suministro de agua potable) hacia la I4.0
* Visión: A partir del concepto de I4.0, y de procesos industriales (CSF), se plantea (como referencia) una solución desde el punto de vista holónico, teniendo la información para tomar decisiones.

Capítulo III: Caso de Estudio

* Plantear el proceso como modelos UHP
* ¿Cómo simular el comportamiento UHP \*\*
* Caso de estudio:
  + Hidrológicas
  + Descripción de la potabilización
  + Descripción del Modelo Híbrido
  + Condiciones de Operación
  + Propuesta de supervisor y coordinador (Condiciones)

Capítulo IV: Implementación

* Epanet
* MATLAB
* ¿Cómo hacer la simulación híbrida o partida? \*\*
* Simulación

Conclusiones y Recomendaciones

Determinar los modelos de comportamiento de la unidad de potabilización (Modelo de comportamiento del proceso, flujo del producto y recursos).

Establecer las condiciones de conmutación de los modelos obtenidos desde el punto de vista de sistemas a eventos discretos.

Generar el modelo de comportamiento desde el punto de vista de los sistemas híbridos.

Implementar el modelo de comportamiento de la unidad de potabilización en un ambiente de simulación.

Establecer condiciones para generar el gemelo digital e incorporarlas al ambiente de simulación.

Desinfección: Eliminación de microorganismos presentes en el agua y obtener agua apta para el consumo humano

Turbidez

Se debe a partículas que estando en suspensión, como los coloides, le dan al líquido la capacidad de dispersar la luz. Por ejemplo, tierras finamente divididas.

Como puede deducirse, la calidad intrínseca de los cuerpos de agua es el factor a partir del cual se derivan los demás aspectos implicados, entre ellos el tren de potabilización que se aplicará al agua de la fuente de suministro (subterráneo y superficial). [29]

Actualmente, la tendencia es instrumentar y tener cada día más control en las plantas potabilizadoras. Por ello, se incluye este apartado que contiene aspectos de interés práctico para los organismos operadores. Entre los parámetros que pueden ser monitoreados en línea y tiempo real se encuentra el cloro residual, el pH, los sólidos suspendidos, la turbiedad y algunos iones específicos como los nitratos y nitritos. [29]

[29] como se mide el cloro

Gradiente de velocidad con paletas (características de diseño) [29] p.118

Condiciones de operación y equipo: [29]

La coagulación floculación es sensible a muchas variables como la naturaleza de la turbiedad, tipo y dosis del coagulante, pH del agua, composición química de la misma y condiciones de mezclado. De todas, las que se pueden controlar en la práctica son cantidad y tipo tanto de coagulante como del floculante y condiciones de mezclado.

Valores para parshall [36] p62

Metodología de Mantenimiento [40] p20 sedim. P25 filtro

Valores finales de calidad de agua ficha-sobre-

Mantenimiento: Preventivo, Correctivo, Predictivo ([https://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad\_del\_agua/operacion\_potabilizacion/index.html#](https://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html))

Filtros: El tiempo de lavado del filtro se determina cuando se tiene una pérdida de carga predeterminada, cuando la turbiedad del efluente es mayor de 5 UNT o cuando se cumplen unas horas de trabajo determinadas.

Turbiedad del efluente.

Está regulada por el decreto 2105 de julio 26 de 1.983 del Ministerio de Salud, el cual debe consultar en el Anexo No. 1. Queda a criterio del operador de la planta, suministrar el agua por encima de los valores estipulados en el Decreto, en caso de emergencia, porque es preferible suministrarla con un bajo nivel de potabilización, con la debida advertencia a la población, que no suministrarla.

Lavado de filtros

La cantidad utilizada de agua de lavado está comprendida entre el 1.0% y 2.5% del agua filtrada y se calcula así:

• Cantidad de agua gastada en lavado x 100

• Cantidades de agua filtrada

Una cantidad mayor puede ser síntoma de una anomalía en el tratamiento o lecho del filtro.

ARREGLAR

Unidad de sedimentación.

Para realizar el mantenimiento de rutina se apertura la compuerta de descarga de lodos, hasta que el nivel de agua baje 30 cm. Durante el mantenimiento la unidad queda fuera de operación por un periodo de tiempo de aproximadamente TANTOS MINUTOS, con caudal de entrada 300 L/s (caso de estudio), contando el tiempo que tarda en volver al nivel de operación una vez cerrada la compuerta de descarga. En mantenimientos profundos, realizados cada 2 meses en sequía y mensual en tiempos de lluvia, se debe proceder de la siguiente manera:

Arreglar la tabla de operación, agregar los químicos en degradado. Y las mediciones en falla

Partiendo de la idea de generar una propuesta de gemelo digital, y basada la estructura de producción en unidades holónicas, se procede a caracterizar y simular las unidades de potabilización por separado, de modo que cumplan con las condiciones individuales de funcionamiento, transmitiendo la información y estado de funcionamiento a un programa matriz en el que se efectuará la interconexión.

Para llevar a cabo la prueba de concepto se tomaron dos de las unidades funcionales del proceso de potabilización, la unidad de Coagulación y la unidad de Sedimentación. En la unidad de Coagulación se utilizó un modelo matemático para aproximar la relación de dependencia entre la dosis de coagulante a adicionar y las condiciones físico químicas del flujo entrante. Para el caso de la unidad de Sedimentación se utilizó un programa de análisis y simulación de sistemas de distribución de agua potable llamado Epanet, esto con el fin de hacer uso de herramientas conocidas en el ámbito hidrológico, que incluyen algoritmos de cálculo matemático especializado en el área.

Coagulación

La adición de coagulante representa uno de los procedimientos primordiales en una planta de tratamiento de agua, ya que conlleva a que el flujo de salida se encuentre dentro de los límites permisibles para el consumo humano. La efectividad del proceso de coagulación se verá afectada por la dosis de coagulante añadido.

Para obtener la dosis óptima se realiza la prueba de jarras cada vez que se observa un cambio en la turbidez del flujo, sin embargo, es posible realizar un modelo que arroje la cantidad de Sulfato de Aluminio a adicionar, de manera que el procedimiento se realice con mayor rapidez y confiabilidad.

Debido a la naturaleza aleatoria del agua bruta que ingresa a la planta, es razonable utilizar un modelo de predicción estadístico, partiendo de un enfoque de regresión, para determinar la dosis de coagulante apropiada en cada caso. [112] Los parámetros que se toman en cuenta al generar un modelo son las características fisicoquímicas del agua, tales como: Turbidez, pH, color, temperatura, alcalinidad, conductividad.

Para generar un modelo que se adapte a las condiciones hidrológicas del estado Mérida, se utilizaron datos suministrados por el personal de la planta de potabilización, cuyo formato incluye:

Características del flujo: pH, turbidez (NTU), color (UC), alcalinidad (mg/L), cloro residual (mg/L).

Dosis de químicos adicionadas: Gas cloro (kg/h), sulfato de aluminio (Kg/h), cal hidratada (kg/h).

El tiempo de muestreo en los datos es de 1 hora.

El desarrollo del modelo se realizó mediante regresión polinomial, utilizado para predecir una variable dependiente Y con base en múltiples variables predictoras X = (x1, x2. …, xk), puede ser expresado como:

Y = a0 + a1x + a2x2 + … + anxn

Para efectos de determinar la dosis de coagulante ideal, se utilizaron como descriptores las condiciones iniciales del flujo: Turbidez, pH, color y alcalinidad (TABLA TAL), tomando en cuenta aquellas muestras a las cuales se le adicionó una cantidad adecuada de coagulante, es decir las que presentan valores de salida dentro de los siguientes rangos:

NTU <= 5

Color <= 20

pH ~ 7

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Datos | Valor mínimo | Valor máximo |
| Dosis de Sulfato de Aluminio (DSA) |  |  |
| Turbidez (T) |  |  |
| Color (C) |  |  |
| pH (Ph) |  |  |
| Alcalinidad (A) |  |  |

Siguiendo estudios enfocados en la optimización de la dosis de coagulante (CITAR), se probaron varios modelos desarrollados en Matlab, combinando las variables descriptivas obtenidas en planta, mediante el uso de las funciones polyfit(.), regress(.) y fitlm(.). Los modelos que se ajustaron mínimo error al comportamiento real se describen en la tabla TABLA TAL.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Modelo | Variables | RMSE - Modelo | R2 | RMSE – Validación |
| Md7 | T, C | 4,9999 | 0,9855 |  |
| Md2 | T, C | 5,2719 | 0,9839 |  |
| Md6 | T, C | 5,4767 | 0,9826 |  |
| Md1 | T | 10,8130 | 0,9322 |  |
| Md5 | T, C, Ph, A | 12,3296 | 0,9119 |  |
| Md3 | T, C, Ph | 12,6699 | 0,9070 |  |
| Md4 | T, C | 12,8805 | 0,9038 |  |

Se comprueba mediante un estudio de correlación que las variables Ph y A tienen baja correlación con respecto a la variable dependiente DSA. El modelo md7 es resultante del promedio de los dos modelos con menor RMSE luego de ser ajustados en Matlab (Md2 y Md6).

[md7 – dosis sulfato]

El modelo se ajusta a la calidad de agua recibida en la planta de tratamiento en estudio, de igual forma se debe tomar en cuenta el modo de operación de la unidad, para obtener la interacción deseada en la simulación.

[Diagramas]

Sedimentación

Para modelar la unidad de sedimentación se utilizó el programa de redes hidráulicas Epanet, programa orientado al análisis de los procesos de distribución de agua y el seguimiento de calidad, donde se conjugan algoritmos de cálculos e interfaz gráfica que permite plasmar los componentes de una red hidráulica (tuberías, tanques, bombas, válvulas, reservorios) y las condiciones de los mismos, para generar simulaciones en periodos prolongados.

Epanet realiza un seguimiento de la evolución de caudales en tuberías, presión en los nodos, nivel en tanques, estado de bombas y válvulas, a lo largo del periodo de simulación, realizando un equilibrio hidráulico mediante cálculos iterativos. Los algoritmos de cálculo se encuentran en el manual del programa, apéndice D. [123]. Como base, para el cálculo de las pérdidas de carga (ECUACIÓN TAL) se utiliza el coeficiente de fricción de Darcy-weisbach.

Hl = Aq^B

B = 2

A = 0,0826 f(épsilon,d,q)d^-5L

Donde:

Hl perdida de carga.

q caudal

B exponente del caudal

A coeficiente de resistencia

Épsilon : coeficiente de rugosidad de darcy-weisbach

f(épsilon,d,q): fracción de friccion que depende de épsilon, d , q

d: diámetro de la tubería.

L: longitud de la tubería

Q: caudal

Para llevar a cabo la simulación en Epanet, se utilizaron longitudes reales de los tanques y tuberías presentes en la planta, según el plano de diseño suministrado. La unidad consta de dos sedimentadores con una entrada de agua floculada, una salida de agua decantada y una descarga de lodos para cada uno. (figura tal)

[sedimentadores epanet]

En la simulación se añaden válvulas de Control de Caudal (VCQ o FCV por sus siglas en inglés), para asignar el caudal según la información obtenida de la unidad anterior; en un principio se fija el caudal de operación ideal (caudal de diseño, 150 L/s para cada sedimentador). Se configuran también dos reglas simples de control de tanque para su mantenimiento, la apertura y cierre de compuertas de lodos, según los niveles de operación. (TABLA TAL)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Max-max | 3,65 | Apertura Lodos |
| max | 3,40 |  |
| min | 3,16 |  |
| Min-min | 2,65 | Cierre de lodos |

El nivel max-max indica una acumulación en el fondo de lodos, por lo que se apertura la compuerta de vaciado. Entre los niveles min y max se maneja una operación normal, con flujo enviado hacia la unidad de filtración. El nivel min-min indica el nivel mínimo de vaciado del tanque, por lo que se debe cerrar la compuerta de lodos y, en caso de no haber flujo de entrada, anunciar la parada de la unidad.

|  |  |
| --- | --- |
| Normal | 3,40 < h < 3,65 |
| Degradado | h > 3,65, h < 3,40 |
| Falla | h < 3,40 y q = 0 |

El modo de operación se describe a continuación:

[Diagramas]

{DIAMETROS EQUIVALENTES, TUBERÍAS, MEDIDAS ¿????}

Interacción de Unidades

En los procesos de producción se deben describir simultáneamente dos modelos:

• Modelo de modos de operación

• Modelos de comportamiento para el modo de operación

con el fin de determinar el flujo de producto y flujo de proceso.

Sin pérdida de generalidad, se puede decir que una dinámica de un proceso puede representarse como

SDC(U, Y, X, f(.,,.;..), h(.,;..),,x(0)), (1)

donde

U: es el espacio de las entradas,

Y: es el espacio de las salidas,

X: es el espacio de estados,

: es el espacio de los parámetros.

x(0) : Condición inicial del sistema

(.,.,.;.):XxUx→X, función de transición de estado,

(.,.;.):Xx→Y, función de salida,

Como estamos hablando de equipos/plantas/unidades cuyo flujo de producto es continuo, se requiere definir los modos de operación de una unidad. Así, sin perder generalidad tenemos que todo equipo/planta/unidad, inicia, opera, y se para, asociado a estados de arranque, operación y parada. Con la salvedad que la parada puede efectuarse por parada condicionada por finalización de producción o por falla y la operación puede ser normal o degradada. Una descripción más precisa de los modos de operación la podemos definir como: arranque (A), Vacio (V), Operando (O), Parado (P). Para cada modo se debe tener un modelo de comportamiento que puede estar dado en función de su desempeño como Normal (N), Degradado (D), Fallo (F).

Así para Modo , con comportamiento J, según lo definido en (1), se tiene

(2) .

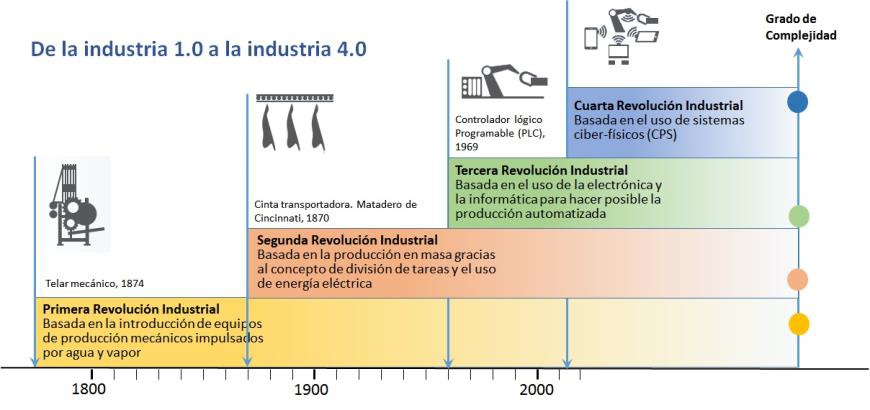
donde

.

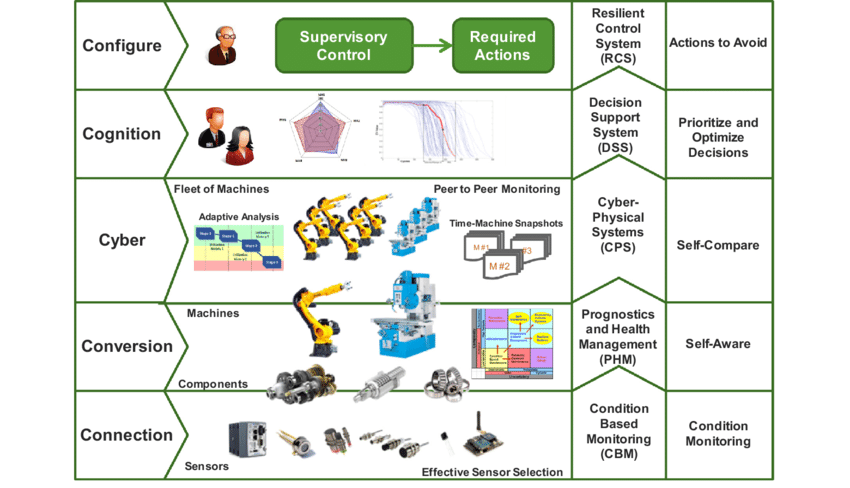
que definen las regiones de operación y por lo tanto la conmutaciones están definidas como:

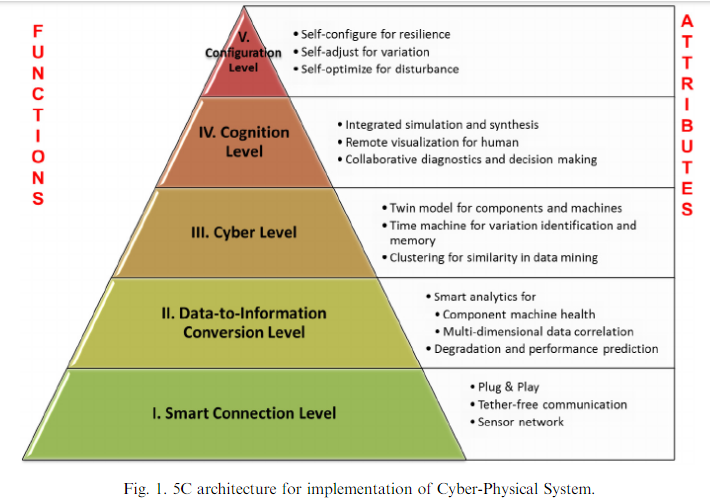
Estas conmutaciones para todo j se presenta en la figura

·



[12]

[66]



[66]

Sistemas Ciber-Físicos



[63]

Sistemas de suministro de agua potable hacia la I4.0

