

## MODELO DE AUTÓMATA FINITO ORIENTADO A MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD EN EL PROCESAMIENTO DE YOGUR

### *FINITE AUTOMATA MODEL DESIGNED TO IMPROVE PRODUCTIVITY IN THE PROCESSING OF YOGURT*

**Nairo Cavieles Rojas**

Universidad de Boyacá, Tunja, (Colombia) • [njcavieles@uniboyaca.edu.co](mailto:njcavieles@uniboyaca.edu.co)

**Carlos Ramírez Martín**

Universidad de Boyacá, Tunja, (Colombia) • [cramirez@uniboyaca.edu.co](mailto:cramirez@uniboyaca.edu.co)

### Resumen

Para las pequeñas y medianas empresas (PyMES) del sector lácteo dedicadas a la fabricación de yogur y ante los nuevos retos económicos que se les impone con la globalización de la economía, se hace necesario que sus procesos industriales respondan a estas necesidades. Es importante resaltar que el procesamiento de productos lácteos como el yogur, demanda un profundo conocimiento de todos los factores y variables involucradas en cada una de las etapas del proceso de producción, comenzando con la recepción de la materia prima, hasta la obtención del producto final; donde se debe cumplir rigurosamente una secuencia de operación.

Por tanto, el modelamiento de procesos industriales con ayuda de herramientas de simulación como los autómatas finitos, permite automatizar procesos, incrementar la productividad, mejorar la calidad en los productos terminados y disminuir los factores de riesgo. Los riesgos profesionales conllevan a accidentes en máquinas de procesos en donde se involucran variables críticas, como altas temperaturas, utilización de ácidos fuertes, microorganismos patógenos, radiaciones y compuestos tóxicos.

Se propone el desarrollo de un modelo de autómata finito, como alternativa de solución para la automatización del proceso en la elaboración del yogur en PyMES. El modelo desarrollado presenta una gran versatilidad, ya que permite seleccionar la clase de yogur a elaborar entre opciones como: yogur entero, yogur semidescremado y yogur descremado. Para el proceso de pasteurización las opciones que ofrece son: ultra pasteurización, de flujo continuo y discontinua. Otra característica ofrecida se presenta en la selección de aditivos, permitiendo optar por un producto aromatizado, natural o frutado.

Las diferentes particularidades del proceso de producción, se encuentran recopiladas en la matriz de estados, la tabla de procesos y la matriz por etapas; las cuales constituyen la base para el desarrollo del modelo de autómatas finitos propuesto.

**Palabras clave:** autómatas finitos, automatismo, PyMES, yogur, sector lácteo

## Abstract

For small and medium enterprises in dairy sector engaged in yogurt manufacture and considering the new economic challenges imposed by economy globalization, result necessary for their industrial processes respond to these needs. Importantly, processing of dairy products like yogurt, demands a thorough knowledge of all factors and variables involved in each stage of production process, starting with raw materials ingress until to obtain final product, which must fulfill strict operating sequence.

Therefore, industrial processes modeling using simulation tools such as finite automata let to automate processes, to increase productivity, to improve quality of finished products and to reduce risk factors. Occupational risks lead to machines processes accidents which involve critical variables, such as high temperatures, use of strong acids, pathogenic microorganisms, radiation and toxic compounds.

This paper shows a development of a finite automata model as an alternative solution for process's automation in yogurt production in small and medium enterprises. The presented model has a great versatility, allowing select the kind of yogurt to make options such as: whole yogurt, skim yogurt and nonfat yogurt. For the pasteurization process options offered are: ultra-pasteurization, continuous flow and discontinuous. Another feature offered is presented in the selection of additives, allowing to choose a flavored product, natural or fruity.

The different characteristics of production process are collected in the matrix of states, the table process and the phased array, which are basis for development of finite automata model proposed.

**Keywords:** finite automata, automatism, matrix, S&MEs, yogurt, dairy sector

## Introducción

Un autómatas finitos es un modelo matemático de un sistema de entradas y salidas discretas que puede estar en una cantidad finita de estados. El estado de un sistema resume la información correspondiente a las entradas pasadas y también se puede usar, junto con las entradas siguientes, para determinar el comportamiento del sistema, (Gómez & Anías, 2008; Renji, 2009; Casares, 2010).

Dentro de los autómatas finitos se destacan, el autómatas finitos determinista (DFA) y el autómatas no determinista (NFA) que a diferencia del DFA para cada estado existen múltiples transiciones posibles para cualquier símbolo de entrada dado. El DFA se caracteriza en que para cada estado en que se encuentre el autómatas y con cualquier símbolo del alfabeto

leído, existe siempre una transición posible desde ese estado y con ese símbolo, (Chakraborty, 2003).

Investigaciones recientes destacan el uso del autómatas subsecuencia (SubAtm), que acepta el conjunto de todas las subsecuencias de una determinada cadena degenerada y el autómatas supersecuencia (SuperAtm), que acepta el conjunto de todas las supersecuencias de una cadena degenerada dada. Los autómatas SubAtm y SuperAtm son deterministas y mínimos y su número de estados y transiciones son lineales con respecto a la longitud de las cadenas degeneradas dadas (Costas et al., 2010). Durante el último medio siglo, ha sido desarrollada una vasta literatura que documenta el concepto valioso y la importancia de los autómatas finitos: deterministas, no deterministas, y alternados (Holzer & Kutrib, 2011).

Los autómatas finitos difusos tienen muchas aplicaciones importantes, como en el aprendizaje de sistemas, reconocimiento de patrones, redes neuronales y teoría de la base de datos (Pedrycz & Gacek, 2001; Mordeson & Malik, 2002; Qiu, 2005). Los autómatas finitos se utilizan en diferentes aplicaciones tales como implementaciones de ingeniería de *software*, lenguajes de programación y otras áreas prácticas de las ciencias de la computación (Bordihn et al., 2009).

Una mezcla de técnicas y resultados de la teoría de autómatas, la lógica, y la complejidad se integró en la teoría de la complejidad de circuitos; que estudia la potencia de cálculo de circuitos booleanos, sobre las restricciones en su tamaño, profundidad y tipo de compuertas permitidas. Familias naturales de circuitos pueden ser descritas por modelos generalizados de autómatas de estados finitos, así como por los sistemas apropiados de lógica de primer orden (Dzelme, 2009).

Con el presente trabajo se busca contribuir a la solución de la baja productividad que presentan las PyMES del sector lácteo, dado que los sistemas electromecánicos y los operarios son susceptibles de cometer errores por diferentes factores. El procesamiento del yogur puede ser automatizado al igual que muchos otros procesos de alimentos, para esto se hace necesario crear modelos matemáticos que permitan simular los procesos desde su inicio, pasando por cada una de las etapas que intervienen hasta obtener un tipo de yogur específico.

Para apoyar la automatización del proceso de elaboración del yogur se ha propuesto un modelo de autómatas finito, consistente en un modelo gráfico digital. El

modelo está representado mediante un diagrama de estados, que hace un seguimiento a cada una de las variables que intervienen en la secuencia de operación, caracterizada por un conjunto de matrices.

## Metodología

Se realizó un análisis exhaustivo del problema y a través de un sondeo en la industria láctea, se planteó una solución para mejorar la productividad en el procesamiento del yogur. La solución propuesta consiste en el desarrollo de un autómatas finito, que por su versatilidad permitirá implementar un simulador y construir el automatismo gobernado a través de éste; las etapas consideradas se describen a continuación.

**Selección de las variables:** se determinaron las variables que influyen en la obtención del producto, acorde con los parámetros físico-químicos y microbiológicos según, ICONTEC (1994). Pruebas de gravedad específica, materia grasa, extracto seco total, acidez, índice crioscópico e índice de refracción se le realizaron a la materia prima. Asimismo, durante el proceso de elaboración del yogur se monitoreó el tiempo y temperatura al producto terminado, se le verificó el contenido de materia grasa, sólidos lácteos, acidez, coliformes totales y *E. coli*.

**Elaboración de yogur:** luego de analizar diversas fuentes sobre el procesamiento del yogur, se encontró una diversidad de diagramas de flujo involucrados en el proceso de elaboración, de tal forma que se compiló un diagrama de bloques representativo del procesamiento de yogur, tal y como se observa en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso del yogur (Hernández, 1998)



Una vez identificadas las principales etapas del proceso de elaboración del yogur, se establecieron las diferentes subetapas, que fueron documentadas a través de diversas fuentes como: Mahecha (1993); Amiot (1995); Marretto (2004); Keating (1999). Los autores presentan una mayor preferencia hacia el procesamiento del yogur frutado, razón por la cual en el diseño del autómatas finitos se optó por desarrollar un modelo más robusto y que por tanto permitiera simular cualquier clase de yogur.

**Elaboración del modelo matemático:** se evaluaron las variables que intervienen en cada etapa del proceso junto con los instrumentos y mecanismos utilizados para medirlas, con base en lo anterior, se elaboró un diagrama de flujo del proceso y se examinaron las relaciones o leyes físico-químicos entre dichas variables, que determinaron el comportamiento del proceso y que sirvieron para formular un modelo matemático determinístico, conformado por un grupo de matrices.

Las matrices construidas para la elaboración del yogur son: la matriz del proceso, la tabla de estados y la matriz por etapas. Una vez creadas las matrices, se procedió a elaborar el modelo gráfico, el cual consiste en un diagrama de estados secuencial, con rutas que conducen a otro estado o a tomar una decisión, dependiendo del valor de las variables en ese estado.

## Resultados y Discusión

Dentro de las principales particularidades de las matrices elaboradas se pueden destacar las siguientes:

La matriz del proceso, está compuesta por las etapas formuladas para la elaboración del yogur tales como

recepción de la leche y control de calidad, tratamiento preliminar, pasteurización–homogenización, inoculación, incubación, enfriamiento, aditivos, envasado y almacenado. Para cada una de las anteriores etapas se realizó una breve descripción de sus características, se presentaron los intervalos óptimos de cada variable en el proceso, los fundamentos teóricos para cada variable, la determinación del instrumento de medición; así como los elementos de laboratorio.

La matriz por etapas, se caracterizó por presentar los nombres de cada estado definido en el modelo, los subprocesos que lo componen, el símbolo de cada variable que interviene, su definición, valoración y cualificación (valoración binaria cero “0” ó uno “1”). En la tabla 1a y tabla 1b, se puede apreciar en detalle las características enunciadas.

En la figura 2a hasta la figura 2f, se puede observar el modelo gráfico definitivo del autómatas, realizado sobre la aplicación Microsoft® Visio 2003. En el diagrama de estados, se representa el proceso completo y detallado mediante subetapas de forma secuencial, donde se presentan los intervalos permitidos para cada variable según las normas vigentes. Adicionalmente, se incluyen las causas y efectos de sobrepasar los rangos permitidos, así como la acción a tomar en cada caso.

En la figura 2a, se observa el inicio del diagrama de estados, donde se presentan las pruebas organolépticas (POrg), pruebas preliminares (Pprel), seguidas de las pruebas fisicoquímicas (Fqi), pruebas para detectar fraude (Pfr) y las pruebas microbiológicas iniciales (Mci). A continuación se presenta el almacenamiento de la leche (AIL) y la decisión sobre consistencia del yogur (Cns).

Figura 2a. Diagrama de estados o autómatas que define el procesamiento de yogur

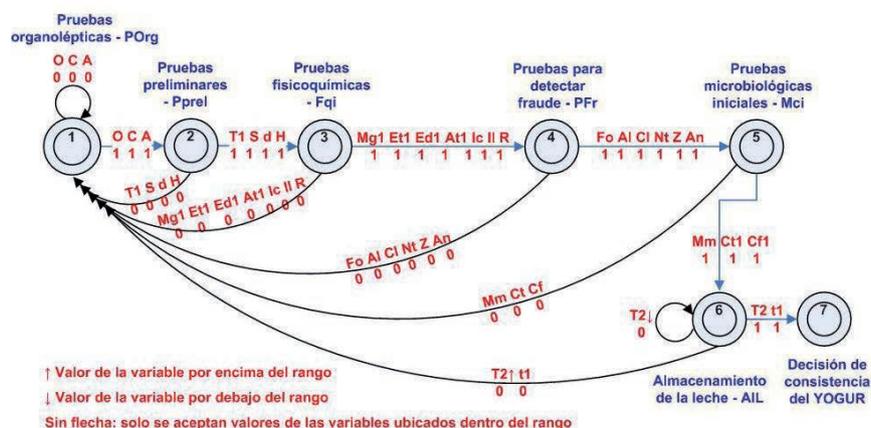


Tabla 1a. Matriz por etapas

Estado	Nombre	Subprocesos	Variables	Definición	Valoración	Cualificación
1	Propiedades organolépticas - Porg		O C A	Olor Color Aspecto	1, 0 1, 0 1, 0	Normal=1, Anormal=0 Normal=1, Anormal=0 Normal=1, Anormal=0
2	Pruebas preliminares - Pprel		T1 S d H	Temperatura de recepción Sedimentos Densidad Prueba de alcohol	1, 0  1, 0 1, 0	Leche refrigerada=1: 2°C<=T1<=6°C. Rechazada=0: T1>6°C (Leche recién ordeñada) Aceptada=1: S<=1mg/500cm³. Rechazada=0: S>1mg/500cm³ Normal=1: d=1.030-1.033 gr/lt. Anormal=0: d=Otro valor Aceptada=1: H=Negativa, Rechazada=0: H=Positiva
3	Propiedades Físicoquímicas iniciales - Fqi		Mg1 Et1 Ed1 At1 Ic Il R	Materia grasa Extracto seco total (Sólidos totales) Extracto seco desengrasado (magro) Acidez total o titulable Índice crioscópico Índice lactométrico Reductasas	1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0	Cumple=1: Mg1>=3%, No cumple=0: Mg1<3% Aceptada=1: Et1>=11,3%. Rechazada=0: Et1<11,3% Aceptada=1: Ed1>=8,3%. Rechazada=0: Ed1<8,3% Aceptada=1: At1=0.14-0.19%. Rechazada=0: At1=Otro valor Aceptada=1: Ic=0,54°C+/- 0,01°C. Rechazada=0: Ic=Otro valor Aceptada=1: Il>=8,4° L. Rechazada=0: Il<8,4° L Aceptada=1: R>=4 h (Horas). Rechazada=0: R<4 h
4	Pruebas para detectar fraude - PFr		Fo Al Cl Nt Z An	Formol Almidones Cloruros Neutralizantes Sacarosa Antibióticos	1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0	Aceptada=1: Fo=Negativa, Rechazada=0: Fo=Positiva Aceptada=1: Al=Negativa, Rechazada=0: Al=Positiva Aceptada=1: Cl=Negativa, Rechazada=0: Cl=Positiva Aceptada=1: Nt=Negativa, Rechazada=0: Nt=Positiva Aceptada=1: Z=Negativa, Rechazada=0: Z=Positiva Aceptada=1: An=Negativa, Rechazada=0: An=Positiva
5	Pruebas microbiológicas iniciales - Mci		Mm Ct1 Cf1	Microorganismos mesófilos Coliformes totales Coliformes fecales	1, 0 1, 0 1, 0	Aceptada=1: n=3, m=40.000, M=80.000, c=1. Rechazada=0: Otros valores Aceptada=1: n=3, m<1, M=10, c=1. Rechazada=0: Otros valores Aceptada=1: n=3, m<1, M=-, c=0. Rechazada=0: Otros valores
6	Almacenamiento de la leche - AL		T2 t1	Temperatura de almacenamiento Tiempo máximo de almacenamiento de la leche	1, 0 1, 0	Aceptada=1: 2°C<=T2<=6°C. Rechazada=0: Otro valor Aceptada=1: t1<=2 días. Rechazada=0: t1>2 días
7	Decisión de Consistencia del yogur		Cons LS	Decisión de Consistencia del yogur Agregar lactosuero	00, 01, 10, 11 1, 0	Sin decisión: Cons=00, Líquido: Cons=01, Batido: Cons=10, Aflanado: Cons=11 Agregar=1, No agregar=0
8	Decisión de Tipo de Yogur		Y T3 f1 G1 Et2 G2 Et3 G3 Et4	Decisión de Tipo de yogur por grasa Temperatura de centrifugado Frecuencia de centrifugado Porcentaje de Grasa Normalización de sólidos totales Porcentaje de Grasa Normalización de sólidos totales Porcentaje de Grasa Normalización de sólidos totales	00, 01, 10, 11 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0 1, 0	Sin decisión: Y=00, Entero: Y=01, Semidescremado: Y=10, Descremado o Light: Y=11 Aceptada=1: T3=Según la máquina (Típica 62°C). Rechazada=0: T3=Otro valor Aceptada=1: f1=Según la máquina (Típico 7000 rpm). Rechazada=0: f1=Otro valor Aceptada=1: G1=3%. Rechazada=0: G1#3%. Aceptada=1: Et2>=11,3%. Rechazada=0: Otro valor Aceptada=1: G1=1,5-2%. Rechazada=0: Otro valor. Aceptada=1: 9,75%<=Et3<11,3%. Rechazada=0: Otro valor Aceptada=1: G1=0,1-0,5%. Rechazada=0: Otro valor. Aceptada=1: 8,65%<=Et4<9,75%. Rechazada=0: Otro valor
9	Decisión de presentación		Pr	Decisión de tipo de presentación	00, 01, 10, 11	Sin decisión: Pr=00, Yogur natural: Pr=01, Yogur frutado: Pr=10, Yogur aromatizado: Pr=11
10	Decisión de agregar estabilizante		Es	Decisión de agregar estabilizante antes de la pasteurización	00, 01, 10	Sin decisión: Es=00, No agregar estabilizante: Es=01, Agregar estabilizante: Es=10
11	Decisión de agregar azucar		Az	Decisión de agregar Azucar antes de la pasteurización	00, 01, 10, 11	Sin decisión: Az=00, Decisión de No agregar azucar: Az=01, Agregar azucar normal: Az=10, Agregar azucar light: Az=11
12	Pasteurización - Homogenización - P-H	PHD (Pasteurización Discontinua)	P-H f2 t2 T4	Decisión de Tipo de pasteurización a utilizar Frecuencia de agitación para homogenización mecánica Tiempo promedio de pasteurización Temperatura de retención	00, 01, 10, 11 1, 0 1, 0 1, 0	Sin decisión: P-H=00, Lenta: P-H=01, Rápida: P-H=10, Ultrapasteurización: P-H=11 Aceptada=1: f2=60 rpm (revoluciones por minuto). Rechazada=0: f2#60 rpm. Aceptada=1: t2=30 min. Rechazada=0: t2#30 min. Aceptada=1: 61<=T4<=63°C. Rechazada=0: T4=Otro valor
		PHF (Pasteurización de Flujo Continuo)	t3 P1 T5	Tiempo promedio de pasteurización Presión de homogenización Temperatura de retención	1, 0 1, 0 1, 0	Aceptada=1: 15<=t3<=17 seg. Rechazada=0: t3=Otro valor. Aceptada=1: 100 Kg/cm2<=P1<=220 Kg/cm2. Rechazada=0: P1=Otro valor Aceptada=1: 72<=T5<=76°C. Rechazada=0: T5=Otro valor.
		UPH (Ultrapasteurización - Para yogures larga vida o UHT)	t4 P2 T6	Tiempo promedio de pasteurización Presión de homogenización Temperatura de retención	1, 0 1, 0 1, 0	Aceptada=1: t4>=2 seg. Rechazada=0: t4<2 seg. Aceptada=1: 220 Kg/cm2<=P2<=350 Kg/cm2. Rechazada=0: P1=Otro valor Aceptada=1: 135<=T6<=150°C. Rechazada=0: T6=Otro valor.

Tabla 1b. Continuación Matriz por etapas

Estado	Nombre	Subprocesos	Variables	Definición	Valoración	Cualificación		
13	Pruebas para confirmar pasteurización - PP		F1	Fosfatasa (Para PHD y PHF)	1, 0	Aceptada=1: F1=Negativa. Rechazada=0: F1=Positiva		
			Pe	Peroxidasa (Para PHD y PHF)	1, 0	Aceptada=1: Pe=Positiva. Rechazada=0: Pe=Negativa		
14	Decisión de tipo de cultivo	Fabricante	Cul	Decisión de Tipo de cultivo	00, 01, 10	Sin decisión: Cul=00, Cultivo tradicional: Cul=01, Cultivo probiótico: Cul=10		
			Fab	Decisión de selección de fabricante	0, 1	Sin decisión: Fab=0, Fabricante seleccionado: Fab=1		
			f3	Frecuencia de agitación para la inoculación	1, 0	Aceptada=1: f3=60 rpm. Rechazada=0: f3≠60 rpm.		
			T7	Temperatura indicada por el fabricante para yogur tradicional	0, 1	Temperatura errada: T7=0, Temperatura indicada por el fabricante: T7=1		
			C1	Concentración indicada por el fabricante para yogur tradicional	0, 1	Concentración errada: C1=0, Concentración indicada por el fabricante: C1=1		
			T8	Temperatura indicada por el fabricante para yogur probiótico	0, 1	Temperatura errada: T8=0, Temperatura indicada por el fabricante: T8=1		
15	Fermentación - Fer	Y Afianado	Cons	Decisión de consistencia del yogur tomada en el estado 7	01, 10, 11	Líquido: Cons=01, Batido: Cons=10, Afianado: Cons=11		
			M	Mermelada de fruta	0, 1	Sin decisión: M=0, Colocar mermelada: M=1		
			Cn	Conservante	0, 1	Sin conservante: Cn=00, Con conservante: Cn=1		
			E	Decisión de envasado	0, 1	Sin decisión: E=0, Envasar: E=1		
16	Incubación - Inc		T9	Temperatura de incubación	1, 0	Aceptada=1: T9=44°C. Rechazada=0: T9=Otro valor		
			Os	Ausencia total de luz (Oscuridad)	0, 1	No hay oscuridad: Os=0, Si hay oscuridad: Os=1		
			pH	Clasificación ácido-base	1, 0	Cumple=1: 4.6<=pH<=4.7. No cumple=0: pH=Otro valor		
			Ac1	Acidez láctica	1, 0	Aceptada=1: 80°D<=Ac1<=100°D. Rechazada=0: Ac1=Otro Valor		
17	Enfriamiento Rápido- Enf1		T10	Temperatura de enfriamiento rápido	1, 0	Aceptada=1: T10=15°C. Rechazada=0: T10≠15°C.		
			t5	Tiempo de aclimatación	1, 0	Aceptada=1: 1,5<=t5<=2 h. Rechazada=0: t5=Otro valor		
18	Enfriamiento lento o Aromatización - Enf2		T11	Temperatura de aromatización	1, 0	Aceptada=1: 4°C<=T11<=6°C. Rechazada=0: T11=Otro valor		
			Ac2	Acidez láctica final	1, 0	Aceptada=1: Ac2=110°D. Rechazada=0: Ac2≠110°D		
19	Batido inicial - Bat1		Cons	Decisión de consistencia del yogur tomada en el estado 7	01, 10, 11	Líquido: Cons=01, Batido: Cons=10, Afianado: Cons=11		
			f4	Frecuencia de agitación inicial	1, 0	Aceptada=1: f4=120 rpm. Rechazada=0: f4≠120 rpm		
			t6	Tiempo de agitación inicial	1, 0	Aceptada=1: t6=1 min. Rechazada=0: t6≠1 min.		
20	Decisión de agregar		Cn	Decisión de agregar Conservante	00, 01, 10	Sin decisión: Cn=00, No agregar conservante: Cn=01, Agregar conservante: Cn=10		
			21	Decisión de agregar aditivos	Pr	Decisión de tipo de presentación tomada en el estado 9	01, 10, 11	Yogur natural: Pr=01, Yogur frutado: Pr=10, Yogur aromatizado: Pr=11
					N (Natural)	0	No se agrega ningún aditivo	
					Fr (Frutado)	M	Mermelada de fruta	0, 1
			Ar (Aromatizado)	Co	Colorante	00, 01, 10	Sin decisión: Co=00, Sin colorante: Co=01, Con colorante: Co=10	
				Sa	Saborizante	00, 01, 10	Sin decisión: Sa=00, Sin saborizante: Sa=01, Con saborizante: Sa=10	
Co	Colorante	00, 01, 10		Sin decisión: Co=00, Sin colorante: Co=01, Con colorante: Co=10				
22	Batido final - Bat2		Cons	Decisión de consistencia del yogur tomada en el estado 7	01, 10, 11	Líquido: Cons=01, Batido: Cons=10, Afianado: Cons=11		
			f5	Frecuencia de agitación final para yogur líquido o batido	1, 0	Aceptada=1: f5=60 rpm. Rechazada=0: f5≠60 rpm.		
			t7	Tiempo de agitación final para yogur líquido	1, 0	Aceptada=1: t7>=10 min. Rechazada=0: t7<10 min.		
			t8	Tiempo de agitación final para yogur batido	1, 0	Aceptada=1: t8=4 min. Rechazada=0: t8≠4 min.		
23	Propiedades fisicoquímicas finales - Fqf	Yogur Entero	Mg2	Materia grasa	1, 0	Cumple=1: Mg2>=2,5%, No cumple=0: Mg2<2,5%		
			Ed2	Extracto seco desengrasado	1, 0	Aceptada=1: Ed2>=7,0%. Rechazada=0: Ed2<7,0%		
			At2	Acidez total o titulable	1, 0	Aceptada=1: At2=0,7-1,5%. Rechazada=0: At2=Otro valor		
		Yogur semidescremado	F2	Fosfatasa	1, 0	Aceptada=1: Negativa. Rechazada=0: Positiva		
			Mg3	Materia grasa	1, 0	Cumple=1: Mg3>=1,5%, No cumple=0: Mg3<1,5%		
			Ed2	Extracto seco desengrasado	1, 0	Aceptada=1: Ed2>=7,0%. Rechazada=0: Ed2<7,0%		
	Yogur descremado o light	At2	Acidez total o titulable	1, 0	Aceptada=1: At2=0,7-1,5%. Rechazada=0: At2=Otro valor			
		F2	Fosfatasa	1, 0	Aceptada=1: Negativa. Rechazada=0: Positiva			
		Mg4	Materia grasa	1, 0	Cumple=1: Mg4<=0,8%, No cumple=0: Mg4>0,8%			
	24	Pruebas microbiológicas finales - Mcf		Ed2	Extracto seco desengrasado (magro)	1, 0	Aceptada=1: Ed2>=7,0%. Rechazada=0: Ed2<7,0%	
				At2	Acidez total o titulable	1, 0	Aceptada=1: At2=0,7-1,5%. Rechazada=0: At2=Otro valor	
				F2	Fosfatasa	1, 0	Aceptada=1: Negativa. Rechazada=0: Positiva	
25	Envasado - Env		H1	Hongos y levaduras	1, 0	Aceptada=1: n=3, m=200, M=500, c=1. Rechazada=0: Otros valores		
			Ct2	Coliformes totales	1, 0	Aceptada=1: n=3, m=20, M=93, c=1. Rechazada=0: Otros valores		
			Cf2	Coliformes fecales	1, 0	Aceptada=1: n=3, m<3, M=, c=0. Rechazada=0: Otros valores		
26	Almacenamiento del yogur - AlY		E	Decisión de envasado	0, 1	Sin decisión=0, Envasar=1		
			S	Decisión de sellado	0, 1	Sin decisión=0, Sellar=1		
			Et	Decisión de etiquetado	0, 1	Sin decisión=0, Etiquetar=1		
			Fe	Decisión de Fchado	0, 1	Sin decisión=0, Fchar=1		
26	Almacenamiento del yogur - AlY		T12	Temperatura de almacenamiento	1, 0	Aceptada=1: 2°C<=T12<=6°C. Rechazada=0: T12=Otro valor		
			t9	Tiempo máximo de almacenamiento	1, 0	Aceptada=1: t9<=4 sem (semanas). Rechazada=0: t9>4		

Continuando con el diagrama de estados, en la figura 2b, se observa que la etapa de consistencia del yogur presenta las opciones de yogur líquido, yogur batido y yogur aplanado, de igual forma despliega la opción de contener o no lacto suero. Seguidamente, la decisión del tipo de yogur (Y) donde se puede optar por yogur entero, semidescremado, descremado o light, a continuación se presenta la etapa de decisión de presentación (Pr), donde se puede optar por yogur natural, frutado y aromatizado. La siguiente etapa está relacionada con la decisión de agregar estabilizante (Es) y presenta la opción de agregar o no estabilizante y termina con la etapa de decisión de agregar azúcar (Az).

En la figura 2c, la etapa de decisión de agregar azúcar presenta opciones como azúcar normal, light y no agregar azúcar. La cual continúa con la etapa de pasteurización-homogenización (P-H) donde se puede optar por homogenización mecánica, a presión media o alta presión. Posteriormente, se encuentra la etapa de pruebas de pasteurización (PP), donde se puede optar por pasteurización discontinua (PHD), pasteurización de flujo continuo (PHF) y ultra pasteurización (UPH).

Finalmente, se encuentra la etapa de decisión sobre el tipo de cultivo (Cul), ofreciendo las opciones de cultivo tradicional (T) y cultivo prebiótico (P).

Figura 2b. Continuación diagrama de estados o autómatas que define el procesamiento de yogur

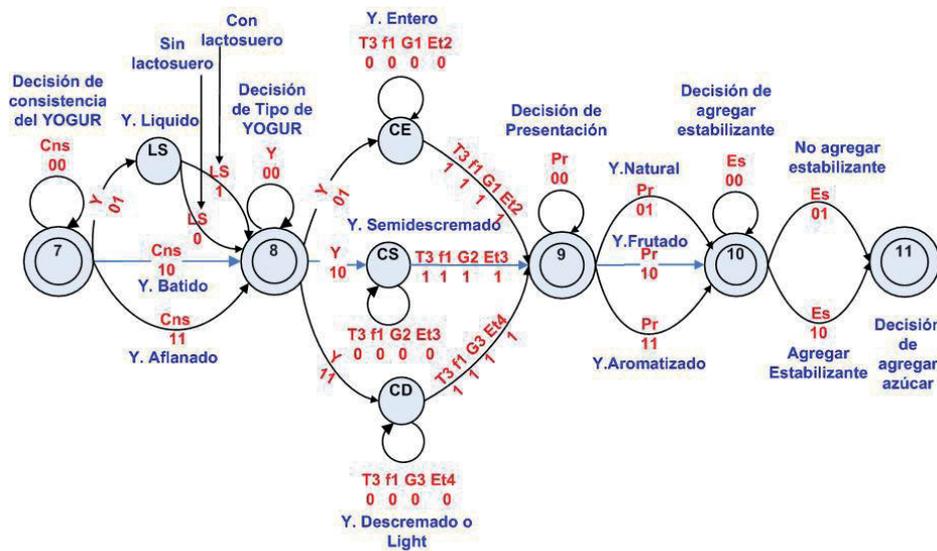
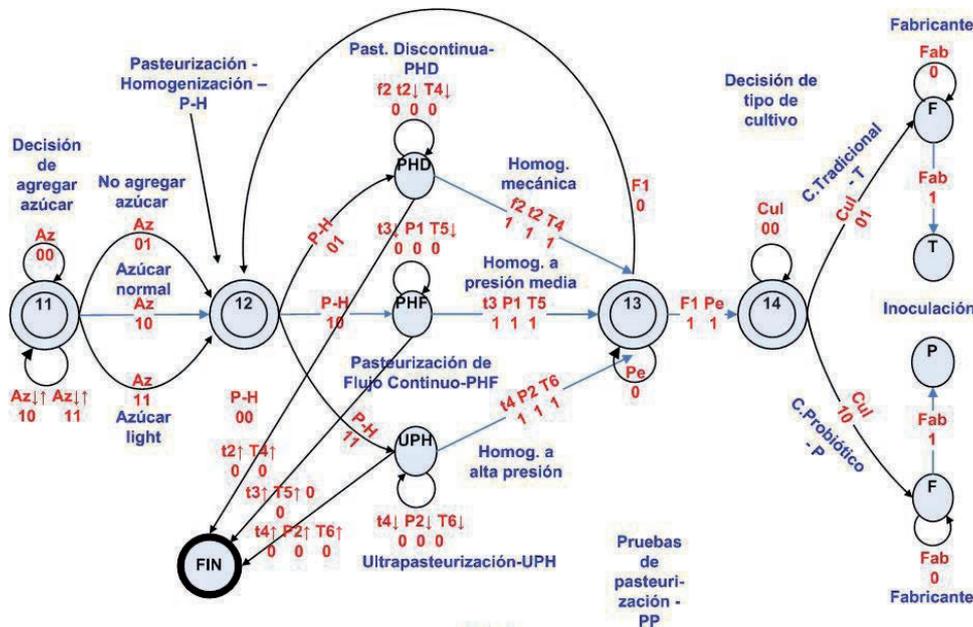
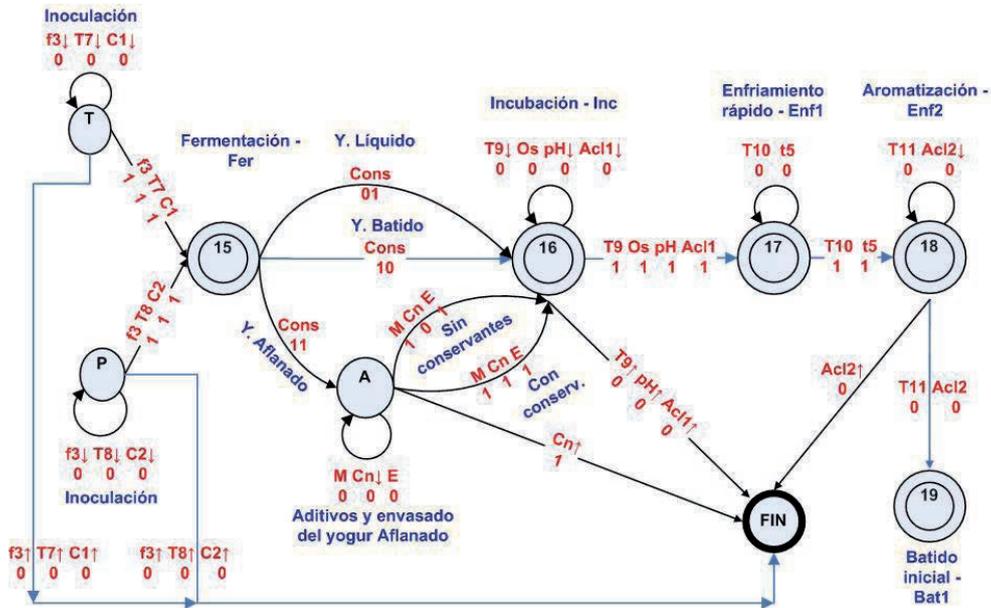


Figura 2c. Continuación diagrama de estados o autómatas que define el procesamiento de yogur



En la figura 2d, se presentan las etapas de fermentación (Fer); incubación (Inc); enfriamiento rápido (Enf1); aromatización (Enf2) y batido inicial (Bat1)

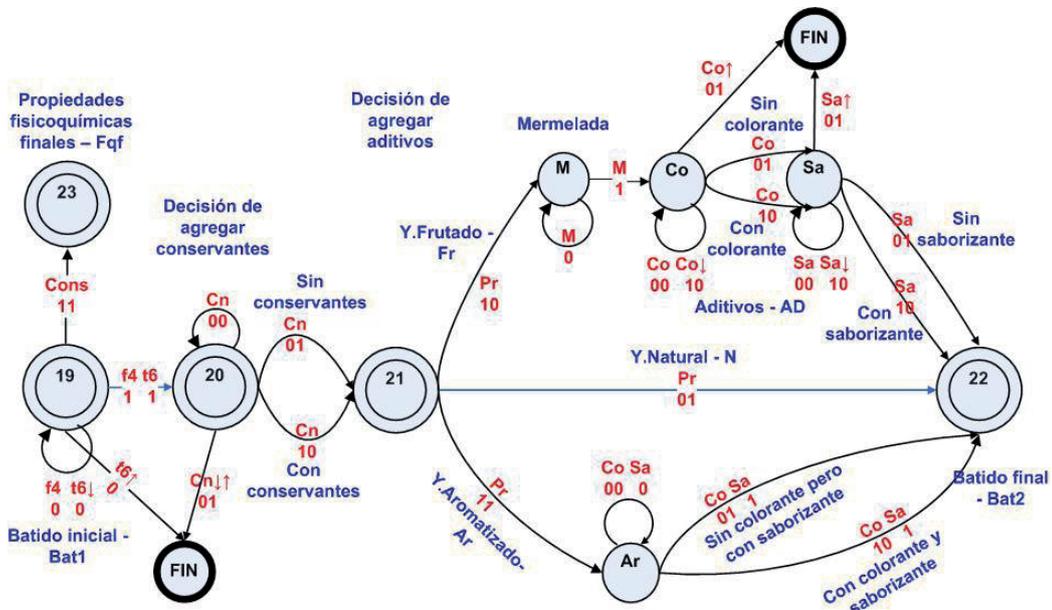
Figura 2d. Continuación diagrama de estados o autómeta que define el procesamiento de yogur



En ese mismo sentido, en la figura 2e se observan las etapas de decisión de agregar conservantes (Cn), presentando la opción de agregar o no conservantes;

seguida de la etapa de decisión de agregar aditivos con diferentes posibilidades y, posteriormente, la etapa de batido final (Bat2).

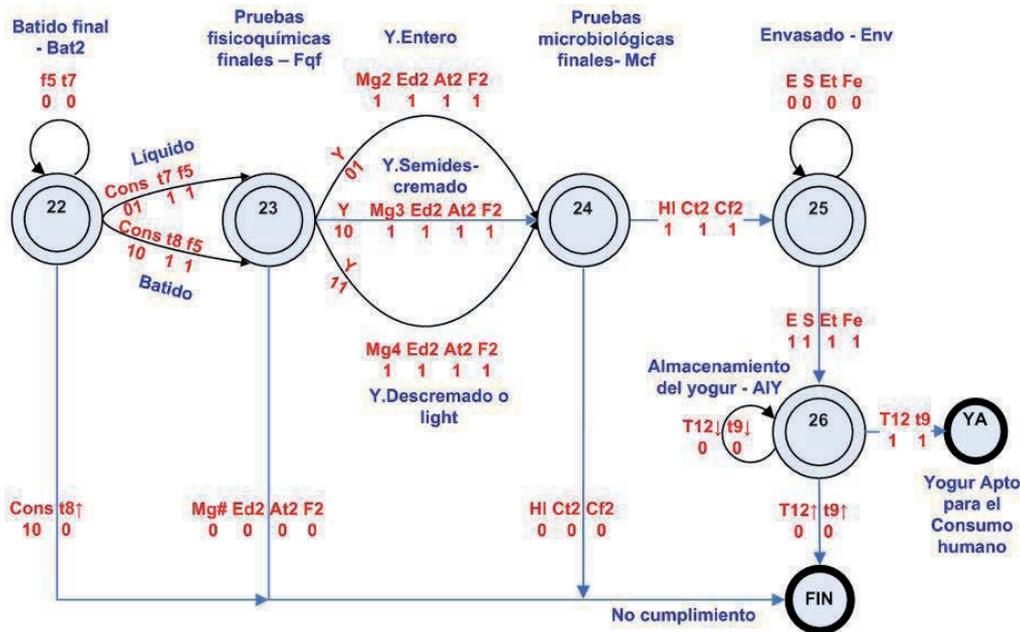
Figura 2e. Continuación diagrama de estados o autómeta que define el procesamiento de yogur



Para finalizar el diagrama de estados, en la figura 2f, se presentan las etapas de pruebas fisicoquímicas finales (Fqf), pruebas microbiológicas finales

(Mcf), seguidas por las etapas de envasado (Env), almacenamiento de yogur (AIY) y presentación del producto final.

Figura 2f. Continuación diagrama de estados o autómata que define el procesamiento de yogur



Se elaboraron diez versiones previas, en donde se fue completando y depurando poco a poco el proceso hasta ajustarlo en el modelo final, el cual se obtuvo en la versión 11. En esta última versión se terminaron de organizar y ajustar las variables en un orden secuencial que responden al proceso real, y se consideró el modelo más completo y adecuado para representar el proceso de elaboración del yogur.

Esta actualización de versiones se estableció como la forma más adecuada de optimizar el modelo. Las matrices y el modelo gráfico en su conjunto conforman el modelo matemático que define el autómata finito, que servirá para desarrollar un simulador donde se podrá realizar un análisis de costos en función de los tiempos de producción, lo cual es tema de otro proyecto de investigación.

Por tanto, el autómata finito desarrollado, se constituye en la base para que a futuro las PyMES puedan implementar o mejorar los procesos de automatización en la elaboración del yogur, contribuyendo a aumentar la productividad y respondiendo competitivamente a las exigencias impuestas por el mundo globalizado.

La principal ventaja que presenta el autómata finito desarrollado, está constituida por su gran versatilidad, debido a que se puede adaptar a las diferentes exigencias que demandan los consumidores de yogur, las

cuales varían dependiendo del lugar geográfico donde habitan. De igual forma, el autómata finito desarrollado contribuye a la solución de una problemática que requiere la inversión de enormes sumas de dinero y que en muchas situaciones no cumplen con los gustos de los consumidores, puesto que provienen de otras regiones o son muy rígidos y no permiten modificaciones.

El control preciso de variables, cuyos rangos pueden ser ajustados, se debe tener en cuenta en la implementación del simulador; dado que con esta opción se permite obtener un producto de mayor calidad, a la vez que reduce costos por pérdidas en caso de errores humanos.

### Conclusiones

Se desarrolló un modelo de autómata finito para mejorar la productividad en el procesamiento del yogur, el cual está compuesto por los diagramas de estado o modelo gráfico y las matrices que lo conforman.

El modelo de autómata finito propuesto presenta una gran versatilidad, puesto que permite simular la elaboración de las diferentes clases de yogur, así como la cantidad de grasa, la consistencia deseada, el tipo de pasteurización a utilizar, la agregación de

aditivos y el tipo de presentación según los gustos del consumidor.

La implementación de autómatas finitos, es muy importante en el control de procesos productivos, por cuanto permite realizar una simulación, para observar los efectos producidos por los cambios en las variables, lo cual a su vez mejora la calidad del producto terminado, ahorrando tiempo y dinero.

Las variables que intervienen en cada una de las nueve etapas en que se divide el proceso de elaboración del yogur deben ejecutarse de manera estrictamente secuencial, y pueden ser calificadas como aciertos o desaciertos, según cumplan o no con un rango de valores especificado por las normas legales vigentes. En consecuencia, permite representarlas en un sistema digital mediante unos (1s) y ceros (0s).

Elaborar un modelo de autómata finito, que permita el procesamiento de cualquier clase de yogur, contribuye a la solución de la problemática presentada por las PyMES, por lo cual se diseñó un simulador más

completo y con mayores prestaciones a la industria del sector lácteo.

Al desarrollar un modelo de autómata finito, que representa el procesamiento de cualquier tipo de yogur, con variables ajustables según condiciones ambientales y preferencias de cada país o región, genera un valor agregado que tiene mayores probabilidades de ser aceptado e implementado comercialmente.

Las pruebas de laboratorio realizadas, tanto a la materia prima como al yogur, determinaron el cumplimiento de las normas legales vigentes. Los resultados obtenidos siempre se ubicaron dentro de los rangos determinados como normales.

Los rangos de las variables de control establecidos en las normas son muy reducidos, por lo cual un controlador basado en un autómata finito resulta muy adecuado debido a que permite monitorear el proceso permanentemente y de esta forma se contribuye favorablemente a incrementar la calidad del producto terminado.

## Referencias

- Amiot, J. (1995). *Ciencia y Tecnología de la leche*. Zaragoza: Acribia.
- Bordihn, H., Holzer, M. & Kutrib, M. (2009). Determination of finite automata accepting subregular languages. *Theoretical Computer Science*, 410(35), 3209-3222.
- Casares, R. (2010). *La teoría de la información*. Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0
- Chakraborty, S. (2003). Formal Languages and Automata Theory, Regular Expressions and Finite Automata. *Computer Engineering and Networks Laboratory*. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology.
- Costas, I., Sohel R., M., Voráček, M. & Vagner, L. (2010). Finite automata based algorithms on subsequences and supersequences of degenerate strings. *Journal of Discrete Algorithms*, 8(2), 117-130.
- Dzelme, B. I. (2009). Mathematical logic and quantum finite state automata. *Theoretical Computer Science*, 410(20), 1952-1959
- Gómez, de S. A. & Anías B. I. de J. (2008). *Introducción a la computación*. México: Cengage Learning.
- Hernández, L. M. A. (1998) Elaboración del yogur a pequeña escala en el hogar. *Revista Cubana de Alimentación y Nutrición*, 12(1), 55-57
- Holzer, M. & Kutrib, M. (2011). Descriptive and computational complexity of finite automata a survey. *Information and Computation*, 209(3), 456-470.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1994). *Manual de métodos fisicoquímicos para el control de calidad de leche y sus derivados*. GTC 3 Parte 1. Bogotá, Colombia.
- Keating, P. F. (1999). *Introducción a la lactología*. México: Limusa.
- Mahecha, J. G. (1993). *La leche y sus derivados*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Maretto, D. (2004) ¿Cómo se hace el yogur? *Proyecto EXPLORA Ecología Microbiana y su relación con nuestro bienestar*.
- Recuperado de <http://graficas.explora.cl/otros/Xsemana/yogur.html>
- Mordeson, J. N. & Malik, D. S., (2002). *Fuzzy Automata and Languages: Theory and Applications*. New York: Chapman & Hall/CRC
- Pedrycz, W. & Gacek, A. (2001). Learning of fuzzy automata. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 1(1), 19-33.

Qiu, D. (2005). Supervisory control of fuzzy discrete event systems: a formal approach. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B*, 35(1), 72-88.

Renji, T. (2009). *Finite Automata and Application to Cryptography*. Tsinghua: University Press.

## Sobre los autores

---

### **Nairo Cavielles Rojas**

Ingeniero Electromecánico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Especialista en Auditoría de Sistemas de la Universidad Antonio Nariño. Estudiante de Maestría Energías Renovables de la Universidad Internacional del Atlántico. Docente de planta y miembro del Grupo de Investigación en Instrumentación, Automatización y Control (GIMAC) de la Universidad de Boyacá. Carrera 2 Este No. 64-169 Tunja, Colombia. njcavielles@uniboyaca.edu.co

### **Carlos Ramírez Martín**

Físico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Estudiante de Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica. Docente de planta y miembro del Grupo de Investigación en Instrumentación, Automatización y Control (GIMAC) de la Universidad de Boyacá. Carrera 2 Este No. 64-169 Tunja, Colombia. cramirezm@uniboyaca.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.