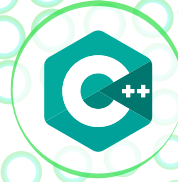


REVECOM

REVISTA VENEZOLANA DE COMPUTACIÓN

ML • Java • Python • C# • C++ • Scala
Perl • Haskell • Lisp • JavaScript



Sociedad Venezolana de Computación

Vol. 7, No. 2
Diciembre 2020



ISSN: 2244-7040



REVECOM

Revista Venezolana de Computación

**Sociedad Venezolana
de Computación**

**Editores:
Eric Gamess, Wilmer Pereira, Yudith Cardinale**

ISSN: 2244-7040

**Vol. 7, No. 2
Diciembre 2020**

Editorial

Derribando la Muralla: un Nuevo Modelo para la Seguridad Corporativa

El tema de la seguridad de datos en sistemas de acceso múltiple tiene una larga trayectoria, comenzando a principios de los años 60 con los primeros sistemas de tiempo compartido. Durante mucho de su historia, el enfoque ha sido la autenticación de usuarios y el control de acceso a los datos según una política de seguridad, todo implementado desde un punto central en una máquina compartida. Las técnicas de contraseñas, *capabilities*, modos de acceso etc. son bien conocidos y no merecen repetirse en un resumen como este.

Todo cambió cuando las organizaciones empezaron a adaptar su infraestructura informática a las redes, sobre todo cuando las mismas se conectaron al Internet. El problema de la seguridad de acceso se exagera y se combina con el de la seguridad de los datos que viajan sobre la red. Hay menos control físico sobre los terminales, y los datos viajan sobre redes públicas que pueden ser interceptadas, bien sea pasivamente (problema de privacidad) o activamente (problema de confiabilidad).

La estrategia adoptada en la comunidad de la seguridad informática fue similar a la de los barones medievales ante el problema de los invasores (que en muchos casos eran sus vecinos): poner todo lo más importante dentro del castillo y rodearlo con una muralla y foso. En el caso de la red corporativa, a la muralla y foso se les llama cortafuego o *firewall* (el término es un poco desafortunado porque implica que la función es el confinamiento de un problema dentro de un área en lugar de evitar su penetración desde afuera, pero lo hecho, hecho está). Por supuesto, de la misma manera que el castillo tiene su portón y puente levadizo, los usuarios de confianza tienen que poder atravesar la muralla para acceder a los recursos dentro del perímetro, así que el tema de la autenticación persiste. Pero ahora las cosas son más difíciles: si los datos viajan en claro sobre la red, los adversarios pueden escucharlos e intervenir. Para manejar esto, es imprescindible el uso de la criptografía, tanto para la fase de autenticación como para la conexión una vez establecida.

Todo lo anterior es bien conocido y no hace falta entrar en detalles. Sin embargo, la situación se complica para las instituciones que implementan servicios distribuidos para sus propios empleados. Tanto los servidores como los mismos usuarios pueden estar ubicados en distintos lugares, incluso en distintos países. Si bien los servidores pueden estar en sitios bajo el control físico de la empresa, como sería una oficina o centro de datos regional, lo mismo no es cierto para los usuarios, que en muchos casos trabajan fuera de la oficina y con dispositivos portátiles con acceso al Internet. Ciertamente, una red corporativa basada en VPN (*Virtual Private Network* o red virtual privada) y una arquitectura de firewalls sirve para interconectar los centros de datos, pero usar la misma infraestructura para miles de empleados se vuelve engorroso y propenso a fallas.

A lo anterior se agrega el tema del grano de control sobre los accesos. El modelo de perímetro inculca la idea de *fuera* y *dentro*, con la implicación de que todo que viene de afuera es sospechoso y debe ser bien controlado, mientras que todo que viene de adentro es confiable. Sin embargo, la realidad es que el acceso a recursos debe ser controlado por una política de seguridad que determina el mínimo grado de privilegio necesario para cumplir una función, donde la ubicación física del usuario puede ser una consideración, más no la única.

Editorial

En reconocimiento de la creciente complejidad que presenta este escenario, múltiples jugadores tanto gubernamentales como industriales han empezado a elaborar los conceptos que ahora llamamos *Zero Trust Networks* (ZTN, también ZTA por *Zero Trust Architecture*). Según el documento NIST Special Publication 800-207 (<https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>) titulado “Zero Trust Architecture”, algunos de los principios fundamentales de las ZTAs se pueden resumir como:

- Tanto las fuentes de datos como los servicios informáticos son recursos. Pueden haber múltiples clases de dispositivos: tanto los centralizados que son gerenciados directamente por la empresa, como (si las políticas los incluyen) los personales que manejan los usuarios.
- Toda comunicación debe ser segura, independiente de su ubicación en la red. Estar “dentro del perímetro” no implica que el acceso es otorgado sin verificación, y la comunicación siempre debe ser realizada de la manera más segura posible tanto para la confidencialidad como para la integridad, incluyendo verificación de origen.
- El acceso a cada recurso se otorga explícitamente por sesión (donde la definición de “sesión” puede determinarse en algunos casos por proximidad en el tiempo) y nunca es implícita. Es decir, el acceso a un recurso no debe implicar el acceso a otro a menos que esto sea explícito en la política de seguridad.
- El acceso a cada recurso es determinado por una política de seguridad que puede ser dinámica e incluir factores como la identidad del usuario, la aplicación o servicio y el comportamiento del usuario. También puede contemplar factores del ambiente como el día y hora, o la versión del software instalado.
- La empresa debe monitorear la integridad y condición de seguridad de todos los activos. Ningún activo es de confianza implícita. Los activos pueden incluir dispositivos que no pertenecen a la empresa (el portátil personal de un empleado por ejemplo), los cuales pueden tener un grado distinto de acceso a los recursos.
- La autenticación y autorización se evalúan dinámicamente y son de cumplimiento obligatorio antes de otorgar el acceso. Es de notar que estas evaluaciones se aplican no solo a los usuarios y los dispositivos que utilizan directamente, sino también a los activos de la empresa en sus centros de datos. Por ejemplo dos servidores deben autenticarse mutuamente antes de poder intercambiar datos.

Se recomienda una lectura del documento para ahondar en el tema desde el punto de vista teórico. Sin embargo, uno de los ejemplos reales más importantes de una ZTA es BeyondCorp, una arquitectura creada por Google para sus operaciones internas (y ahora comercializado como producto para sus clientes grandes). Para más detalles, véase varios artículos en <https://research.google/pubs/pub43231>.

Es de notar que estos esfuerzos en su mayoría no introducen nuevas tecnologías. Son proyectos de la ingeniería, más que la ciencia, de la computación. No obstante, son importantes y merecen ser más conocidos. Para la mayoría de las pequeñas y medianas empresas, estos desarrollos suenan como fantasías, y no hay duda que en este momento requieren mucho compromiso e inversión tanto materiales como de recursos humanos. No obstante, lo mismo se decía alguna vez sobre las redes y los firewalls. Los tiempos cambian y tarde o temprano tenemos que adaptarnos a las nuevas realidades.

Patrick O’Callaghan
Profesor de la Universidad Simón Bolívar

Revista Venezolana de Computación

ReVeCom (Revista Venezolana de Computación) es la primera revista venezolana arbitrada, periódica, digital, orienta a la publicación de resultados de investigación en el campo de la computación. ReVeCom fue creada por la SVC (Sociedad Venezolana de Computación) y tiene entre sus objetivos hacer conocer los trabajos de alta calidad investigativa que se realizan a nivel nacional, latinoamericano e internacional. La revista permite la divulgación de artículos con aporte original en castellano o inglés.

En noviembre de 2020, se celebraron conjuntamente la Octava Conferencia Nacional de Informática, Computación y Sistemas (CoNCISa 2020) y la Octava Escuela Venezolana de Informática (EVI 2020). Inicialmente, los eventos estaban planificados para ser realizados presencialmente en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, en Caracas, pero finalmente se realizaron en forma virtual debido a la pandemia del COVID-19.

La edición de este decimotercero número de ReVeCom está dedicada a los mejores trabajos presentados en CoNCISa 2020. Esta edición consolida un esfuerzo grande que se ha venido haciendo en el seno de la SVC, para promover la investigación en el campo de la computación a nivel nacional, e impulsar una nueva generación académica y profesional en nuestra área de saber para el desarrollo del país.

ReVeCom es una revista abierta para una mayor difusión de los resultados de investigación. Cuenta con una página web (<http://www.svc.net.ve/revecom>), donde se encuentran los trabajos publicados e información sobre la revista. La revista promueve la pluralidad de intereses, dando cabida a la divulgación de trabajos de todos los campos del conocimiento inherentes a la computación.

Además de selecciones de los mejores artículos de conferencias, ReVeCom también publica artículos de investigación en el campo de la computación, a través de un arbitraje por expertos del área. Por ende, se hace una invitación amplia a la comunidad informática nacional, latinoamericana e internacional, a someter sus propios trabajos para los números de ReVeCom por venir.

Directorio de la Sociedad Venezolana de Computación

Presidente:

Dr. Leonid Tineo (Universidad Simón Bolívar – Venezuela)

Vicepresidente:

Dr. Eric Gamess (Jacksonville State University – USA)

Secretario:

Dr. Wilmer Pereira (Instituto Tecnológico Autónomo de México – México)

Tesorero:

Dr. David Coronado (Universidad Simón Bolívar – Venezuela)

Coordinadora de Educación e Investigación:

MSc. Mildred Luces (Universidad Nacional Experimental de la Gran Caracas – Venezuela)

Coordinadora de Publicaciones:

Dra. Yudith Cardinale (Universidad Simón Bolívar – Venezuela)

Coordinadora de Eventos:

MSc. Soraya Carrasquel (Universidad Simón Bolívar – Venezuela)

Edición

Comité Editorial

Director:

Dr. Eric Gamess - Jacksonville State University, USA
Redes de computadores, computación de alto desempeño, simulación.

Coordinador del Comité Editorial:

Dr. Wilmer Pereira - Instituto Tecnológico Autónomo de México, México
Inteligencia artificial, robótica autónoma, aprendizaje automatizado.

Jefe de Redacción:

Dra. Yudith Cardinale - Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Computación paralela, computación de alto desempeño, sistemas distribuidos, computación en la nube, arquitecturas paralelas, servicios web, web semántica.

Miembros del Comité Editorial

Dr. Carlos Acosta - Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Computación paralela, computación de alto desempeño, computación reconfigurable y FPGAs, simulación paralela y distribuida, BigData.

Dr. Andrés Arcia-Moret - Xilinx Cambridge, Reino Unido
Simulación de redes, protocolos de transporte, redes inalámbricas.

Dr. Ernesto Coto - University of Oxford, Reino Unido
Computación gráfica, visualización científica, procesamiento digital de imágenes.

Dra. Francisca Losavio - Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Ingeniería del software, arquitecturas y calidad del software, producción industrial de software.

Dr. Francisco Luengo - Universidad del Zulia, Venezuela
Computación social, minería de texto.

Dr. Jonas Montilva - Universidad de Los Andes, Venezuela
Ingeniería del software, sistemas de información.

Dra. Masun Nabhan - Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Inteligencia artificial, minería en datos, aplicaciones de inteligencia artificial para educación y discapacitados.

Dra. Dinarle Ortega - Universidad de Carabobo, Venezuela
Ingeniería del software, arquitectura del software, arquitecturas empresariales, modelado de procesos de negocio.

Dr. David Padua - University of Illinois, USA
Compiladores, computación de alto desempeño.

Dr. Leonid Tineo - Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Bases de datos, lógica difusa, lenguajes artificiales, minería de datos.

Tabla de Contenido

Editorial	ii
Revista Venezolana de Computación	iv
Directorio de la Sociedad Venezolana de Computación	v
Comité Editorial	vi
Tabla de Contenido	vii
1. An Approach to Model-based Fault Diagnosis of Manufacturing Processes and Machines using Probabilistic Boolean Networks	1-9
Pedro Rivera, Orestes Llanes	
2. Vehicle-to-Person Interaction: A Survey	10-21
Carlos Palacio, Eric Gamess	
3. Cachicamo: Un Videojuego de Plataformas para la Concienciación en la Preservación del Armadillo Gigante	22-33
Edgar Bernal, Esmitt Ramírez	
4. RGBaGris: Decolorización de Imágenes en el Dominio Espectral Empleando CIELab	34-45
Irena Cabanach, Esmitt Ramírez	
Índice de Autores	46

An Approach to Model-based Fault Diagnosis of Manufacturing Processes and Machines using Probabilistic Boolean Networks

Pedro J. Rivera Torres¹, Orestes Llanes Santiago²
privera@ece.uprm.edu, orestes@tesla.cujae.edu.cu

¹ Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

² Departamento de Automática y Computación, Instituto Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba

Abstract: Developing systems and methodologies capable of monitoring the condition and diagnosing multiple faults in industrial/manufacturing systems are topics of active and continuous research. In this paper, a fault diagnosis system inspired on the Probabilistic Boolean Networks (PBN) with Intervention model is suggested as a tool for diagnosing faults of a group of machines in a manufacturing process. The proposed approach considers the failure modes of the machines involved that are affecting the function and performance of the system. Firstly, the modes are identified and divided into two groups: faults and failures. The former implies detectable degradation of system function until the threshold for fault, which is eventual catastrophic loss of system, is surpassed. The latter leads to catastrophic fault. Then, using PBN, both classifications can be diagnosed and actions to mitigate them can be taken. The proposal also allows to forecast a time in hours by which the fault or failure will be imminent. The method herein discussed was applied to an ultrasound welding cycle, and a PBN with interventions model was created, simulated and verified through by means of model checking in PRISM. Results obtained show the validity of this methodology.

Keywords: Fault Detection and Isolation; Multiple Faults; Probabilistic Boolean Networks; Reliability.

I. INTRODUCTION

For current industry to produce goods of the highest quality, while complying with environmental, safety and other regulations, the efficiency of its processes requires constant improvements. Any unscheduled stops in production and equipment faults impact negatively system availability, operational and environmental safety, and the productivity and profitability of the business. Proper operation of these systems involves compensating the effects disturbances and changes can have, and in order to assure continuous operation within performance specifications, faults have to be detected, isolated and eliminated, all of which are tasks related to Fault Detection and Isolation (FDI) [19]. FDI methods are mainly divided in two categories, which are model-based and process-history-based [39,41].

Model-based methods make use of either an analytical or computational model of the systems. A varied spectrum of the proposed model-based methods are supported by some basic concepts such as: the parity space, observer approach and the parameters identification or estimation approach [14,17,18]. The authors in [44] show that the observers and parity space methods do not always permit the isolation of actuator faults. For models that are non-linear in nature, the complexity on the observer design method increases, whereas an precise system model is needed for the parity space approach [44]. To

overcome these problems a more recent approach based in the solution of an inverse problem using computational intelligence tools has been presented [1,6,7]. In general, the developed researches have been limited to the diagnosis of independently occurring faults.

Diagnosing simultaneous faults is an area not sufficiently addressed in scientific literature. Multiple fault detection in dynamic systems can be challenging, because the effects of a fault may hide or be compensated with the effects of different type of fault, and because equal types of multiple faults can manifest themselves in different forms, considering their order of occurrence. The computational intelligence tools have been the most used to address this area [41,36,27]. In this sense, research has focused on static systems [36], solutions to the multiple faults problem through observations on imperfect tests as in [32], to determine the closest evolution relative to the state of the fault. The authors of [43] postulate an algorithm-based pattern recognition method for diagnostics, which resulted in high efficiency and precision, but with cases in experimental data where particular fault tests didn't have a solution. Other developments include SLAT patterns for multiple fault diagnosis [5], and model-based methods for describing multiple faults in rotor systems [3]. However, multiple fault diagnosis is a current research area which demands the development of novel strategies for improving the performances of the fault diagnosis systems. The principal objective of this paper is to

present a new approach of multiple faults diagnosis in industrial systems by using Probabilistic Boolean Networks (PBN).

Biomimetic methodologies are widely used in manufacturing for the solution of many complex problems. Qualitative frameworks, such as PBNs allow describing large biological networks without loss of important system properties, and allowing the representation of complex behavior, such as self-organization. PBNs are used to model Gene Regulatory Networks (GRN); collections of DNA segments inside a cell that interact indirectly with other segments and substances in it to regulate/govern the expression level of genes. They are used to understand the general rules that govern gene regulation in genomic DNA. PBNs are transition systems that satisfy the Markov Property, (memoryless, not dependent on the history of the system). Proposed by I. Shmulevich [33] by extending Kauffman’s Boolean Network (BN) concept [20,21], they combine the rule-based modelling of Boolean Networks with uncertainty principles. These Probabilistic Boolean Network consist of a series of constituent BNs that have assigned selection probabilities, where each BN may be considered a “context”. Data for each of the cells comes from dissimilar sources; where each represents a cell context. In each given point in time t , a system can be governed by one of these constituent BNs, and the system switches to another constituent BN at another time, with a given switching probability. Figure 1 presents one of the constituent BNs of the Pick and Place PBN, keeping in mind that a PBN is a collection of BNs.

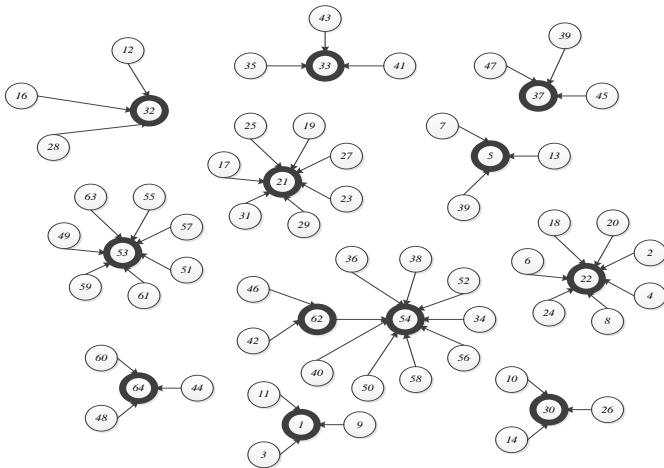


Figure 1: Transition Diagram of One of the Constituent BNs of the Pick and Place PBN

PBNs for manufacturing systems were introduced in Rivera Torres et al. [28] and further developed in [29-31]. In this article, the use of PBNs in manufacturing systems will be expanded to allow the consideration of faults that may lead to catastrophic failure, being this a first contribution of this research. The proposed model allows detection and classification of single and multiple faults which constitute another contribution of the proposal. It allows identification of fault states in which it is possible to continue operation, and those where it is not possible to continue (failure). It also allows to forecast a time in hours by which the fault or failure will be imminent. As a final contribution, the system provides information about the maximum probability of fault and failure

occurrence, which allows better maintenance planning. This paper is organized in the following manner: Section II discusses Probabilistic Boolean Networks and their use in manufacturing systems modeling, Section III presents how these PBNs can be used for FDI in these systems. Section IV discusses the experimental results. Finally, the conclusions of this research and future works are presented.

II. PROBABILISTIC BOOLEAN NETWORKS IN MANUFACTURING SYSTEMS

Boolean Networks (BN) [20,21] and Probabilistic Boolean Networks [32,33] have been proposed as a way of modeling manufacturing systems and process’ dynamics (validated through model checking), and predict their future behaviors with statistical analysis and discrete event simulation [28-31]. This use has been very well documented in literature, for modeling biological systems [2,4,8,13,16,38], and for modeling GRNs [9-11,15,22,38]. The mechanism of intervention [34] is used to steer the evolution of the network and guide it away from undesired states, such as those associated with disease. BNs are a finite set of Boolean variables (nodes), with states approximated to 0 or 1, for which, their state is determined by the current state of other nodes in the BN. It has a set of input nodes called regulatory nodes and a set of Boolean functions (predictors) that regulate the value of a target node. If the set of nodes and their corresponding functions is defined, the BN is defined. PBNs are basically a collection of BNs for which at any discrete time interval, the node state vector transitions are based on one of the rules of the constituent BNs. These context-sensitive, dynamical and probabilistic BNs satisfy the Markov property.

In [28], the authors demonstrated that PBNs are valid for modeling manufacturing systems, by establishing the method, validating it through model checking, and comparing the results obtained through simulation with actual machine data. In it, the authors demonstrated that PBNs are valid for modeling manufacturing systems, by establishing the method, validating it through model checking, and comparing the results obtained through simulation with actual machine data. In [29], the authors used the same methodology applied to a manufacturing process to obtain quantitative occurrence data for DFMEA. In [30] the authors expand the application of PBNs in industrial manufacturing systems by incorporating the intervention mechanism to guide a modeled manufacturing system away from possible failure modes, thus delaying eventual failure of the system. For a detailed description of PBNs, see [34].

III. PBNs FOR FDI IN MANUFACTURING SYSTEMS

To present the proposed method, the system introduced in [29-31] is utilized, consisting of three elements, an off-the-shelf ultrasonic welding station, and two off-the-shelf robotic hands, or “pick and place” machines will be modeled. This process has been taken from [29], and is reproduced here for reference. The welding station system is composed of a 2.5 KW power supply unit, an actuator housing a 3-inch air cylinder, a 20-micron converter, a 1:2.0 gain booster and a 20kHz, 1:1 gain horn. This station will join two rigid parts. The “pick and place” has movement in both the x and y axes, and using grip holds, places and removes parts to and from the welder into an assembly line. The pick and place loads the parts into the welding station. Once

these parts are welded, a second pick and place will remove the welded parts. Figure 2 presents a finite-state machine of the above described welding system.

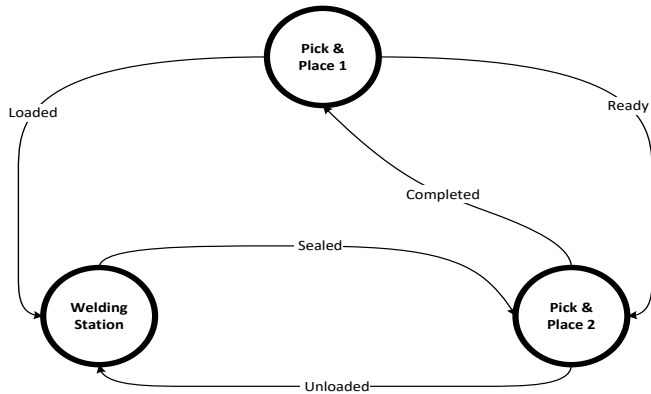


Figure 2: Ultrasonic Welding Process from Rivera Torres et al [28]

The method proposed herein adapts the FDI scheme described in [25], where a model is used for normal operation of the process and another model is used for each one of the different faults. PBNs self-organize into attractor states, and these states are related to the different failure modes that the system experiences. Model construction, and semantics are identical to [29]. Through characterization of the failure modes, the models can, with property verification, characterize the state of their relevant components to determine which component failures correlate to machine and/or system fault conditions. A notable difference from past efforts is that this system is modeled as a PBN of PBNs. Each of the node of the systems' PBN is in itself a PBN. The PBN for the Pick and Place machines is detailed in [28] with its components, predictors and selection probabilities for each of the functions, in addition to its BN realizations, vector functions, attractors and the selection probabilities for each realization. The method is very flexible, and the design of the PBN and its state transitions depends on the amount of resolution that the experts need, based on design specifications. The system can grow in complexity and expression depending on the needs of the experts. Normal operation is modeled through simulation of the system's machines, based on the reliability analysis performed in [28,29]. This can be modeled for the system as a whole, or for each of the machines that compose it, through simulation of their relevant components, based on each of the component's Mean Time Between Failures (MTBF) data. Each of the system's faults are modeled based of the Design Failure Mode and Effects Analysis (DFMEA) conducted in [29], and similarly for each of the possible faults for each machine. Therefore, the model is able to detect and isolate single machine and multiple machine faults for the system, and also single and multiple component faults on the individual machines. The Welding Station is also a 6 node PBN. This PBN has 14 constituent BNs. Table I describes the individual components, along with their predictor function, and their probability of selection. Table II shows each realization, along with its vector function and probability of selection.

As an example, in the case of the second predictor of the Actuator's Converter, the next state of the actuator's converter, with an 88% probability will depend on the current state of the

actuator/converter, the current state of the power supply, and the current state of the actuator cylinder.

Table I: Predictors and Selection Probability, Welding Station PBN

Component	Predictor	Selection Prob. $C_j^{(I)}$
x_1 , Actuator Cylinder	$x_1(t+1) = x_1(t)$	1
x_2 , Power Supply	$x_2(t+1) = x_2(t)$	1
x_3 , Actuator Converter	$x_3(t+1) = x_3(t) \& x_2(t)$	0.12
	$x_3(t+1) = x_3(t) \& x_2(t) \& x_1(t)$	0.88
x_4 , Actuator Booster	$x_4(t+1) = x_4(t) \& x_2(t)$	0.12
	$x_3(t+1) = x_4(t) x_3(t) x_2(t) x_1(t)$	0.88
x_5 , Actuator Horn	$x_5(t+1) = x_5(t) \& x_2(t)$	0.12
	$x_5(t+1) = x_5(t) x_4(t) x_2(t)$	0.88
x_6 , Transducer	$x_6(t+1) = x_6(t) \& x_2(t)$	0.12
	$x_6(t+1) = x_6(t) x_1(t) x_2(t)$	0.88

With this structure, it is possible to classify faults and failure modes per machine (through the individual machine's PBN) and system faults and failure modes (through the system's PBN). The authors propose the establishment of the model using the PRISM model checker [24], in order to validate its use and check its formal correctness using Probabilistic Computational Tree Logic (PCTL). The model is composed of an input module, which uses PRISM's local non-determinism to provide the input to the PBNs. Three modules for each PBN model the machines involved in the process, and a fourth system PBN module modules the behavior of the whole process. An output module produces the system state based on the state of the individual modules. This way, given the different faults and failure modes of the individual machines (which are based on the possible fault conditions of their components) the model produces the failure modes corresponding to the system. The failure modes for each machine were discussed in [29], and are based of FMEAs conducted on each of the machines involved in the process.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

This section details the experimental results of the tests performed to validate the adequacy of the proposed model. PRISM was employed to validate the model quantitatively and to produce data required for statistical tests, used to determine the level of correspondence. Experiments were conducted using three PBN models: a model for the Pick and Place robots, a model for the welding station, and a model representing the process. The models presented in [28-31] were expanded to include fault conditions that may lead to failure on the individual machines and system. This allows the prediction of conditions that may not cause complete failure, but rather failure modes that may lead to situations where the system continues its operation, but cannot perform the required task to specifications. These constitute unhealthy system states, where a fault condition can be treated or lead to failure. For each machine, and for the complete process, FMEAs were performed as per [29], and a determination was made of which system components and failure modes can produce a failure or a fault.

As an example, the relevant nodes of the Pick and Place PBN are the gripper, a rotary axis, a fixed axis, a motor for the rotary axis, a motor for the fixed axis, and a power supply for the machine. On the Pick and place machines, failure of the gripper, fixed axis or rotary axis will cause a fault on the Pick and place as a whole. Failure of the motors or the power supply will cause a fault on the Pick and place. Three modules constitute the complete models in PRISM, an Input module, a module for the PBN, and an Output module. The current state of the PBN's components is in module Input. The PBN module uses the state of the input variables and applies the corresponding Predictors, as per Section III, to transition to the next state. Based on the values of these variables, and the fault conditions, the state a global variable is changed, giving us the current state of the machine. In these experiments, time is expressed in hours (h). Control groups were created through modeling and simulation of the systems' relevant components, with the components' corresponding MTBF obtained from real technical data sheets.

These control groups were established for the Pick and Place, the Welding Station, and the complete system, that involves all three machines. Control data was used to compare against the PBN models, representing expected values. Three experimental groups were created: PBN model of the system (all involved machines), PBN model of the Pick and Place robots, and PBN model of the Welding Station. Property verification in PRISM was employed for determining the maximum probability of occurrence of any of the failure modes that could lead to fault, for each of the presented models. From an initial state for each of the machines, such as all the possible failure modes that may lead to fault on the machine, a determination is made about the maximum probability of reaching one of the different identified fault conditions. Statistically significant differences between both the control and experimental groups (PBN models) were checked. Property verification in PRISM not only allows us to verify the models, they also allow, through experiments, to reach an estimate in time about when fault occurrence is certain.

Table II: Welding Station Constituent BN Vector Functions

Realization	Vector Function	Probability
1	$f_1 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_1^{(4)}, f_1^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_1 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_1^{(4)} \cdot c_1^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.00020736$
2	$f_2 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_1^{(4)}, f_2^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_2 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_1^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.00152064$
3	$f_3 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_1^{(4)}, f_2^{(5)}, f_2^{(6)})$	$u_3 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_1^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_2^{(6)} = 0.01115136$
4	$f_4 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_2^{(4)}, f_1^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_4 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_1^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.00152064$
5	$f_5 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_2^{(4)}, f_1^{(5)}, f_2^{(6)})$	$u_5 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_1^{(5)} \cdot c_2^{(6)} = 0.01115136$
6	$f_6 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_2^{(4)}, f_2^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_6 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.01115136$
7	$f_7 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, f_2^{(4)}, f_2^{(5)}, f_2^{(6)})$	$u_7 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_1^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_2^{(6)} = 0.08177664$
8	$f_8 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_1^{(4)}, f_1^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_8 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_1^{(4)} \cdot c_1^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.00152064$
9	$f_9 = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_1^{(4)}, f_2^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_9 = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_1^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.01115136$
10	$f_{10} = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_1^{(4)}, f_2^{(5)}, f_2^{(6)})$	$u_{10} = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_1^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_2^{(6)} = 0.08177664$
11	$f_{11} = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_2^{(4)}, f_1^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_{11} = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_1^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.01115136$
12	$f_{12} = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_2^{(4)}, f_1^{(5)}, f_2^{(6)})$	$u_{12} = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_1^{(5)} \cdot c_2^{(6)} = 0.08177664$
13	$f_{13} = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_2^{(4)}, f_2^{(5)}, f_1^{(6)})$	$u_{13} = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_1^{(6)} = 0.08177664$
14	$f_{14} = (f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(3)}, f_2^{(4)}, f_2^{(5)}, f_2^{(6)})$	$u_{14} = c_1^{(1)} \cdot c_1^{(2)} \cdot c_2^{(3)} \cdot c_2^{(4)} \cdot c_2^{(5)} \cdot c_2^{(6)} = 0.59969536$

Detection: The models are able to detect faults and failures, based on the application of the PBN. Given the current state of the network genes, the PBN will select an appropriate context and self-organize into one of the attractor states of their constituent Boolean Networks. As an example, in Table I the predictors and selection probability of each predictor is given for the Welding Station. Table II illustrates the BN context, and the probability of each of those contexts being selected. Work in [29], equated the context to the different failure modes that can occur. The input module of the model randomizes the current state of the machine, and based on the current state, the PBN module will apply the predictors and select a BN. The output model contains all of the identified fault conditions/failure modes of a machine, and after the application of the predictors evaluates the state of the machine's components, and makes a determination of the state of the machine as a whole. The machine can be in a complete failure

condition, or in a fault condition, that can be specifically described based on the condition of the components, allowing detection and isolation of individual or combined faults. The first test conducted was to determine the maximum probability of reaching any of the failure modes leading to fault of the Pick and Place through verification of a Probabilistic real time Computational Tree Logic (PCTL) property. This property was tested for the Pick and place's PBN model, and the control group. Two sample T-tests were performed using Minitab 16 to look for statistically significant differences among the group means. The null hypothesis states that there is no difference between the Control and PBN groups, or $H_0: \mu \text{ Control} = \mu \text{ PBN}$. The alternative hypothesis would be finding differences between the Control and PBN Model groups, or $H_0: \mu \text{ control} \neq \mu \text{ PBN}$. For an α -level of 0.05 for the test, the conclusion is that for the Pick and Place, there are no statistically significant differences between the groups (p -value > 0.05). This means

that there is no difference between both groups. Results of the two-sample T test are presented in Figures 3 and 4. Figures 5 and 6 show the results for the Welding Station, and Figures 7 and 8 show results for the System. In these graphs, time is represented in hours (*h*).

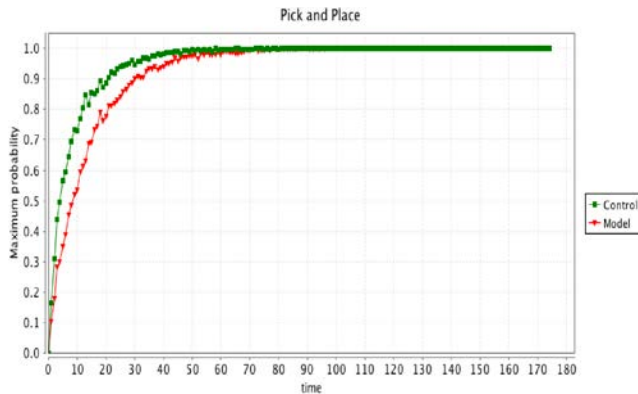


Figure 3: Maximum Probability Pick and Place PBN vs Control

Two-Sample T-Test and CI: Control-PP, Model-PP

Two-sample T for Control-PP vs Model-PP

N	Mean	StDev	SE Mean	
Control-PP	175	0.953	0.139	0.011
Model-PP	175	0.923	0.178	0.013

Difference = μ (Control-PP) - μ (Model-PP)
 Estimate for difference: 0.0292
 95% CI for difference: (-0.0043, 0.0628)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 1.71 P-Value = 0.088 DF = 328

Figure 4. Two-sample T Test: Pick and Place PBN vs Control Group

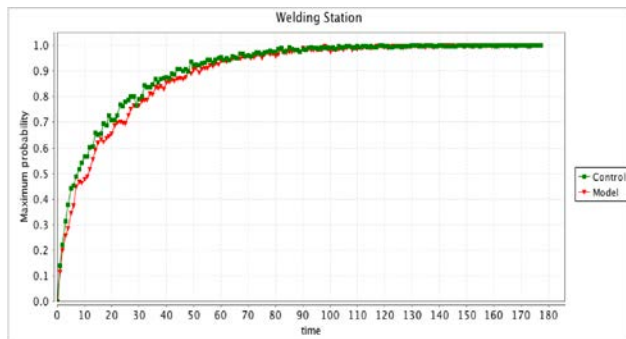


Figure 5: Maximum Fault Occurrence Probability for the Welding Station PBN vs Control

Diagnosis: Labels in PRISM can be used to single-out specific states, or sets of states. They can be used to single out single faults, or combinations of faults. When the PBN is applied and a constituent BN is selected, these labels provide a way of filtering which fault is occurring, or if the machine is operating correctly. Within the output module, all of the possible failure and fault conditions on the machine caused by the components that have been identified are expressed, and this allows to determine its future state. This allows not only to discern which

specific fault or combination of faults is occurring, but through property verification we can make use of these labels to produce a prognosis, an estimate in time of when the fault is expected to occur. Knowing the probability of fault and failure occurrence allows the system designers to make decisions about the interventions needed for the system or machine and minimize the downtime needed for maintenance. For example, $P_{max}=? [F <= \text{time } "singleGripFault"]$ verifies the maximum probability of occurrence of single grip faults on the Pick and Place model. There are 63 different fault/failure conditions, and a normal operating state. Figure 9 shows a plot of this probability, and at 2579 hours a single fault of the grip can be expected.

Two-Sample T-Test and CI: Control-WS, Model-WS

Two-sample T for Control-WS vs Model-WS

N	Mean	StDev	SE Mean	
Control-WS	178	0.905	0.172	0.013
Model-WS	178	0.888	0.188	0.014

Difference = μ (Control-WS) - μ (Model-WS)
 Estimate for difference: 0.0162
 95% CI for difference: (-0.0214, 0.0538)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 0.85 P-Value = 0.397 DF = 351

Figure 6: Two-sample T Test: Welding Station PBN vs Control Group

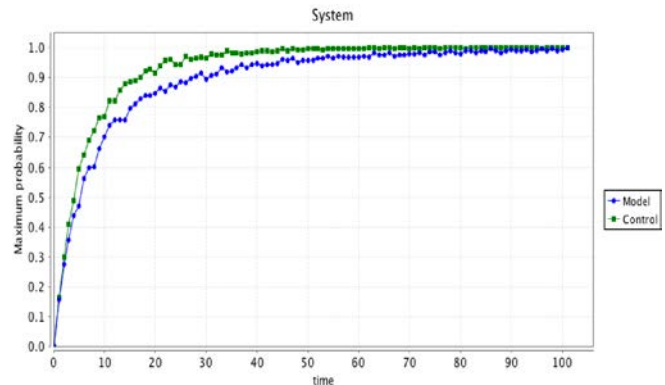


Figure 7: Maximum Probability of Fault Occurrence for the System PBN vs Control

Two-Sample T-Test and CI: Control-Sys, Model-Sys

Two-sample T for Control-Sys vs Model-Sys

N	Mean	StDev	SE Mean	
Control-Sys	102	0.887	0.181	0.018
Model-Sys	102	0.927	0.173	0.017

Difference = μ (Control-Sys) - μ (Model-Sys)
 Estimate for difference: -0.0403
 95% CI for difference: (-0.0891, 0.0086)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -1.63 P-Value = 0.106 DF = 201

Figure 8: Two-sample T Test: System PBN vs Control Group

Single faults may be modeled through verification of other properties, such as, in the welding station's PBN: $P_{max}=? [F \leq \text{time} (\text{powerSupply}=\text{true} \ \& \ \text{actuatorCylinder}=\text{true} \ \& \ \text{actuatorBooster}=\text{true} \ \& \ \text{actuatorConverter}=\text{true} \ \& \ \text{actuatorHorn}=\text{true} \ \& \ \text{transducer}=\text{false})]$. This property yields the maximum probability of occurrence of one of the welding station's failure modes that can lead to a fault on the machine, caused by the transducer. In this way, individual faults are detected and isolated. Figure 10 illustrates this property verification graphically.

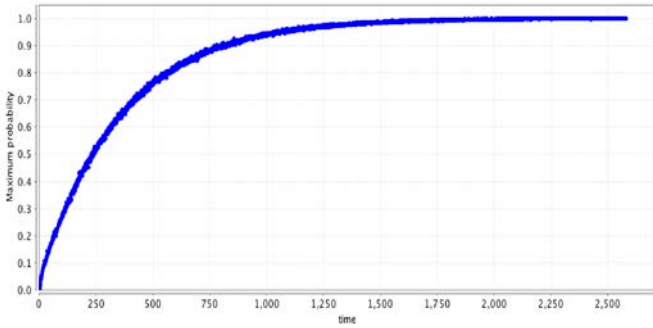


Figure 9: Maximum Probability of Occurrence of Gripper Faults

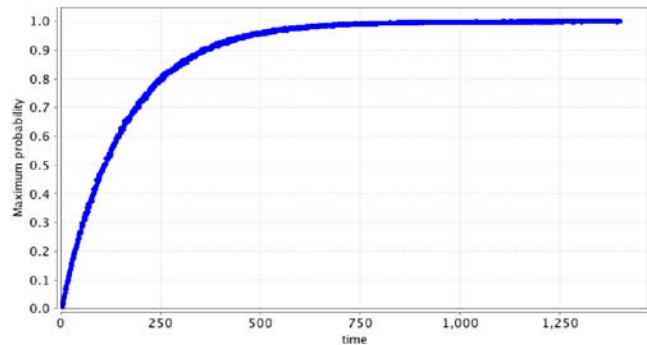


Figure 10: Welding Station Fault Condition: Transducer

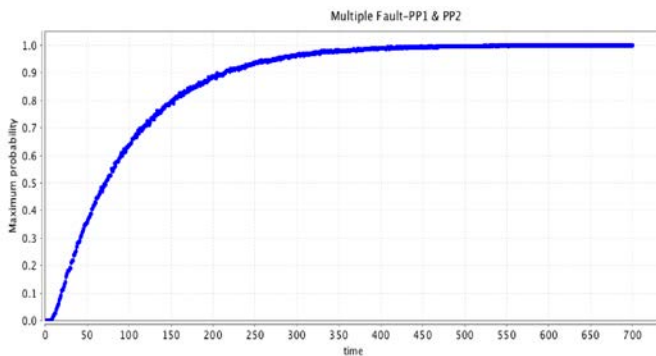


Figure 11: Simultaneous Faults of Pick and Place 1 and Pick and Place 2

The system is also capable of detecting multiple simultaneous faults. Experiments were performed to verify the capability of detecting multiple faults of the system, using the System's PBN model, specifically simultaneous faults detected on both Pick and Place machines, simultaneous faults detected on Pick and Place 1 and the Welding Station, and a simultaneous fault on Pick and place 1 and failure on Pick and Place 2. Through

property verification, the system is able not only to detect these simultaneous faults, but is also able to tell when the fault is imminent. Figure 11 shows a simultaneous fault on Pick and Place 1 and Pick and Place 2, and shows that the faults will manifest at around 700 hours of continuous operation. Figure 12 shows the occurrence of simultaneous faults on Pick and place 1 and the Welding Station, where a combination of failure on those machines will be certain at about 500 hours of operation.

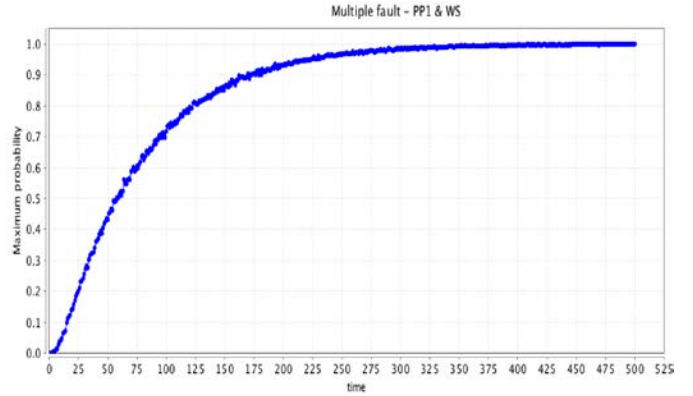


Figure 12: Simultaneous Fault on Pick and Place 1 and the Welding Station

Figure 13 shows a fault on Pick and Place 1 and a failure on Pick and Place 2. This condition can be expected after 1544 hours of operation.

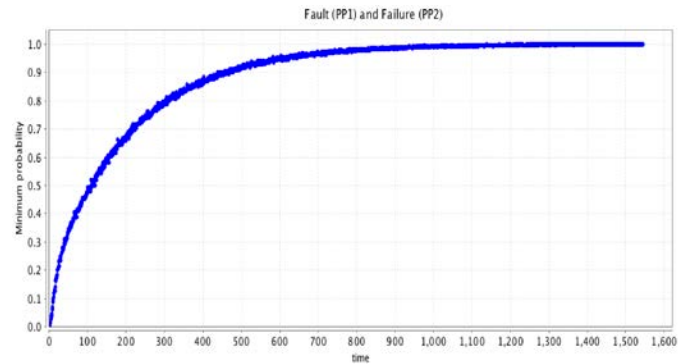


Figure 13: Simultaneous Fault on Pick and Place 1 and Failure on Pick and Place 2

Figure 14 shows the maximum probability of occurrence of a multiple fault, where a condition that can generate a multiple fault will manifest at 1679 hours of operation. With PRISM, it is possible to plot the states of variables in a simulation to track their state changes.

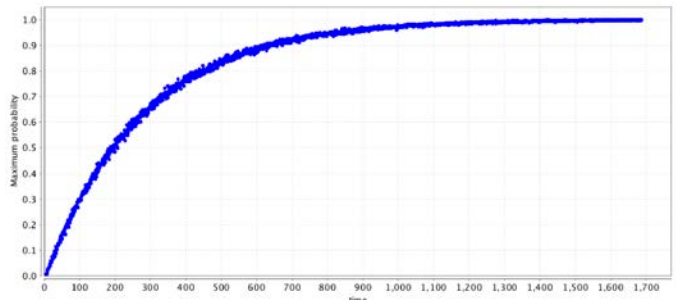


Figure 14: Maximum Probability of Occurrence of Multiple Faults

In Figure 15, diagnosis of faults and failures is illustrated. States of the Pick and Place have been labeled, and each state of the machine can be individually identified. This means that all faults, single or multiple, can be singled out (detected and isolated) specifically.

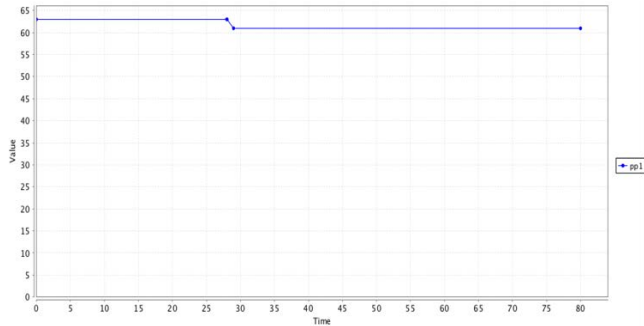


Figure 15: Fault Detection and Diagnosis using the Pick and Place's PBN Model

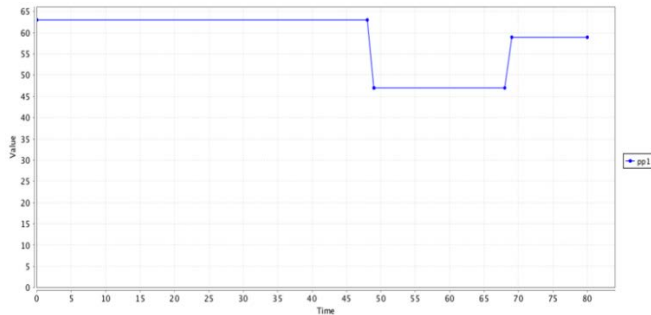


Figure 16: Detection and Diagnosis of Two Faults

Detectability and isolability in this model implies that the system is able to assess the condition of all nodes and relate this condition to a fault or failure as described in Table III. By singling out a particular combination of node states, the overall system state can be detected from Table III. State 64 is the normal operating state of the machine. After 29 hours of normal operation, the simulation identifies a single fault of the rotary axis. If the machine continues to operate without intervention,

this fault may develop into a failure. The initial state of the system is presumed to be the normal operating state.

Figure 16 shows another simulation of 80 hours of continuous operation, where after 48 hours of normal operation, the system detects and diagnoses a failure of motor1a at 49 hours, and a fault of the fixed axis at 69 hours.

Table III is an abbreviated table that presents some of the different states of fault, failure and operation in which the Pick and Place model can be. The full table of states has been omitted due to its length, but it consists of the different states that can lead to failure, faults (single and multiple) and the normal operation of the system.

V. CONCLUSIONS

This paper presents a bioinspired, complex-adaptive modeling methodology that allows modeling single and multiple faults on manufacturing systems using Probabilistic Boolean Networks. The modifications proposed in this paper to the aforementioned architecture and to this new method allowed the classification of single and multiple failures. These permit the scheme proposed in [25], and shown in Figure 1, the detection and isolation of single and multiple faults, along with an estimate of when these faults will present themselves. Statistical tests performed of this data validate the proposed approach for future use and further development. Since these models are based on the definition of the PBNs derived from regulating genes/nodes, this discretization creates a limitation in terms of the possible states that it can represent, but greatly simplifies the analysis. The authors are currently working on new models that may allow new faults to be detected, for further analysis. For future research, an interesting idea is to design a fault diagnosis system based in historical data of the process with the ability to detect and classify multiple and novel faults. Expanding the use of non-binary quantized PBNs will also allow in the future a richer mechanism of expressing fault conditions and failure modes. Another possible avenue of development is the use of the intervention mechanism in FDI-enabled PBN models.

Table III: States of the Pick and Place PBN

Machine state	Description	Machine state	Description
1	failure due to gripper, motor1a, motor1b, fixed axis, rotary axis, and power	33	failure due to motor1a, motor1b, fixed axis, rotary axis, and power
8	failure due to gripper, motor1a, and motor1b	40	failure due to motor1a, and motor1b
9	failure due to gripper, motor1a, fixed axis, rotary axis, and power	41	failure due to motor1a, fixed axis, rotary axis, and power
15	failure due to gripper, motor1a, and power	47	failure due to motor1a, and power
16	failure due to gripper, motor1a, and motor1b	48	failure due to motor1a, and motor1b
24	failure due to gripper and motor1b	56	failure due to motor1b
25	failure due to gripper, fixed axis, rotary axis, and power	57	multiple fault due to fixed axis, rotary axis, and power
28	failure due to gripper, and fixed axis	60	single fault due to fixed axis
29	failure due to gripper, rotary axis, and power	61	failure due to rotary axis, and power
30	failure due to gripper, and rotary axis	62	single due to rotary axis
31	failure due to gripper, and power	63	failure due to power
32	single fault due to gripper	64	normal operation

REFERENCES

- [1] C. Acosta Díaz, C. L. Camps-Echevarría, A. Prieto Moreno, A. J. Silva Neto, and O. Llanes-Santiago, *A Model-based Fault Diagnosis in a Nonlinear Bioreactor using an Inverse Problem Approach and Evolutionary Algorithms*, Chemical Engineering Research and Design, vol. 114, pp. 18-29, 2016.
- [2] D. N. Arnosti and A. Ay, *Boolean Modeling of Gene Regulatory Networks: Driesch Redux*, PNAS, vol. 109, no. 45, pp. 18239-18240, 2012.
- [3] N. Bachschmid, P. Pennacchi, and A. Vania, *Identification of Multiple Faults in Rotor Systems*, Journal of Sound and Vibration, vol. 254, no. 2, pp. 327-366, 2002.
- [4] V. Bane, V. Ravanmehr, and A.R. Krishnan, *An Information Theoretic Approach to Constructing Robust Boolean Gene Regulatory Networks*, IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, vol. 9, no. 1, pp. 52-65, 2012.
- [5] T. Bartenstein, D. Sliwinski, and D. H. Huisman, *Diagnosing Combinational Logic Designs using the Single Location At-a-Time (SLAT) Paradigm*, in Proceedings of the IEEE International Test Conference (ITC), pp. 287-287, Baltimore, USA, October, 2001.
- [6] L. Camps Echevarría, O. Llanes-Santiago, J. A. Hernández Fajardo, A. J. Silva Neto, and D. Jiménez, *A Variant of the Particle Swarm Optimization for the Improvement of Fault Diagnosis in Industrial Systems via Faults Estimation*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 28, pp. 35-61, 2014.
- [7] L. Camps Echevarría, O. Llanes-Santiago, H. F. Campos Velho, and A. J. Silva Neto, *Fault Diagnosis Inverse Problems: Solution with Metaheuristics*, Studies in Computational Intelligence Series, vol. 763, Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-89978-7.
- [8] C. Chaouiya, O. Ourrad, and R. Lima, *Majority Rules with Random Tie-breaking in Boolean Gene Regulatory Networks*, PLoS ONE, vol. 8, no. 7, 2013.
- [9] H. Chen and J. Sun, *Stability and Stabilisation of Context-sensitive Probabilistic Boolean Networks*, IET Control Theory & Applications, vol. 8, no. 17, pp. 2115-2121, 2014.
- [10] X. Chen, H. Jiang, and W.-K. Ching, *On Construction of Sparse Probabilistic Boolean Networks*, East Asian Journal on Applied Mathematics, vol. 2, no. 1, pp. 1-18, 2012, DOI: 10.4208/eajam.030511.060911a.
- [11] W.-K. Ching, X. Chen, and N.-K. Tsing, *Generating Probabilistic Boolean Networks from a Prescribed Transition Probability Matrix*, IET Systems Biology, vol. 3, no. 6, pp. 453-464, 2009.
- [12] W.-K. Ching, S.-Q. Zhang, Y. Jiao, T. Akutsu, N.-K. Tsing, and A.-S. Wong, *Optimal Control Policy for Probabilistic Boolean Networks with Hard Constraints*, IET Systems Biology, vol. 3, no. 2, pp. 90-99, 2009.
- [13] G. Didier and E. Remy, *Relations between Gene Regulatory Networks and Cell Dynamics in Boolean Models*, Discrete Applied Mathematics, vol. 160, no. 15, pp. 2147-2157, 2012.
- [14] P. M. Frank, *Analytical and Qualitative Model-based Fault Diagnosis - A Survey and Some new Results*, European Journal of Control, vol. 2, no. 1, pp. 6-28, 1996.
- [15] Y. Gao, P. Xu, X. Wang, and W. Liu, *The Complex Fluctuations of Probabilistic Boolean Networks*, BioSystems, vol. 114, no. 1, pp. 78-84, 2013.
- [16] F. Ghanbarnejad, *Perturbations in Boolean Networks as Model of Gene Regulatory Dynamics*, doctoral dissertation, Leipzig: University of Leipzig, 2012.
- [17] R. Isermann, *Process Fault Detection based on Modeling and Estimation Methods—A Survey*, Automatica, vol. 20, no. 4, pp. 387-404, 1984.
- [18] R. Iserman, *Model based Fault Detection and Diagnosis. Status and Applications*, Annual Review of Control, vol. 29, no. 1, pp. 71-85, 2005.
- [19] R. Isermann, *Fault-diagnosis Applications: Model-based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*, Springer-Verlag, London, UK, 2011.
- [20] S. A. Kauffman, *Homeostasis and Differentiation in Random Genetic Control Networks*, Nature, vol. 224, pp. 177-178, 1969.
- [21] S. A. Kauffman, *Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Constructed Genetic Nets*, Journal of Theoretical Biology, vol. 22, no. 3, pp. 437-467, 1969.
- [22] K. Kobayashi and K. Hiraishi, *Reachability Analysis of Probabilistic Boolean Networks using Model Checking*, in Proceedings of the SICE annual conference, pp. 829-832, Taipei, Taiwan, August, 2010.
- [23] A. Kungeng, W. San, and H. Soon, *Wavelet Analysis of Sensor Signals for Tool Condition Monitoring: A Review and some new Results*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, no. 7-8, pp. 537-553, 2009.
- [24] M. Z. Kwiatkowska, G. Norman, and D. Parker, *PRISM 4.0: Verification of Probabilistic Real-time Systems*. In G. Gopalakrishnan & S. Qadeer (Eds.), Computer Aided Verification, LNCS, vol. 6806, pp. 585-591, Berlin, Springer, 2010.
- [25] L. F. Mendonça, J. M. Sousa, and J. M. Sá da Costa, *An Architecture for Fault Detection and Isolation based on Fuzzy Methods*, Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 2, Part 1, pp. 1092-1104, 2009.
- [26] L. J. D. Miguel and L. F. Blázquez, *Fuzzy Logic-based Decision-making for Fault Diagnosis in a DC Motor*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 18, no. 4, pp. 423-450, 2005.
- [27] A. Rodríguez Ramos, C. Domínguez Acosta, P. J. Rivera Torres, E. I. Serrano, G. Beauchamp, L. Anido, and O. Llanes Santiago, *An Approach to Multiple Fault Diagnosis using Fuzzy Logic*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 30, 2016.
- [28] P. J. Rivera Torres, E. I. Serrano, and L. Anido, *Probabilistic Boolean Network Modeling of an Industrial Machine*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 29, 2015. DOI:10.1007/s10845-015-1143-4.
- [29] P. J. Rivera Torres, E. I. Serrano, and L. Anido, *Probabilistic Boolean Network Modeling and Model Checking as an Approach for DFMEA for Manufacturing Systems*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 29, 2015.
- [30] P. J. Rivera Torres, E. I. Serrano, O. Llanes Santiago, and L. Anido, *Modeling Preventive Maintenance of Manufacturing Processes with Probabilistic Boolean Networks with Interventions*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 29, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1226-x>.
- [31] P. J. Rivera Torres and E. I. Serrano, *Probabilistic Boolean Network Modeling as an Aid for DFMEA in Manufacturing Systems*, Presented at the 18th Scientific Convention of Engineering and Architecture, Havana, Cuba, November, 2016.
- [32] S. Ruan, Y. Zhou, Y. Feili, K. R. Pattipati, P. Willett, and A. Patterson-Hine, *Dynamic Multiple-fault Diagnosis with Imperfect Tests*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, vol. 39, no. 6, pp. 1224-1236, 2009.
- [33] I. Shmulevich, E. Dougherty, and S. Kim, *Probabilistic Boolean Networks: A Rule-based Uncertainty Model for Gene Regulatory Networks*, Bioinformatics, vol. 18, no. 2, 2002.
- [34] I. Shmulevich and E. Dougherty, *Probabilistic Boolean Networks: Modeling and Control of Gene Regulatory Networks*, Philadelphia, PA: SIAM, 2010.
- [35] S. Simani and R. J. Patton, *Fault Diagnosis of an Industrial Gas Turbine Prototype using a System Identification Approach*, Control Engineering Practice, vol. 16, no. 7, pp. 769-786, 2008.
- [36] S. Simani, S. Farsoni, and P. Castaldi, *Wind Turbine Simulator Fault Diagnosis via Fuzzy Modelling and Identification Techniques*, Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 1, pp. 45-52, 2015.
- [37] E. Sobhani-Tehrani, H. A. Talebi, and K. Khorasani, *Hybrid Fault Diagnosis of Nonlinear Systems using Neural Parameter Estimators*, Neural, vol. 50, pp. 12-32, 2014.
- [38] P. Trairatphisan, A. Mizera, J. Pang, A. Tantar, J. Schneider, and T. Sauter, *Recent Development and Biomedical Applications of Probabilistic Boolean Networks*, Cell Communication and Signaling, vol. 11, no. 46, 2014.
- [39] G. Vahedi, *An Engineering Approach towards Personalized Cancer Therapy*. Ph.D Thesis, TAMU, 2009.
- [40] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. N. Kavuri, *A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part 1: Quantitative Model-based Methods*, Computers and Chemical Engineering, vol. 27, pp. 293-311, 2003.

- [41] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. N. Kavuri, *A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part 2: Qualitative Models and Search Strategies*, Computers and Chemical Engineering, Vvol. 27, pp. 313-326, 2003.
- [42] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. N. Kavuri, *A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part 3: Process History-based Methods*, Computers and Chemical Engineering, vol. 27, pp. 327-346, 2003.
- [43] C. H. Vong, P. K. Wong, and K. J. Wong, *Simultaneous-fault Detection based on Qualitative Symptom Descriptions for Automotive Engine Diagnosis*, Applied Soft Computing, vol. 22, pp. 238-248, 2014.
- [44] Z. Wang, M. Marek-Sadowska, K. H. Tsai, and J. Rajska, *Analysis and Methodology for Multiple-fault Diagnosis*, IEEE Transactions on CAD, vol. 25, pp. 558-575, 2014.
- [45] M. Witzak, *Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Nonlinear Systems*, Lecture Notes in Control and Information Sciences Series, vol. 354. Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-71116-2.
- [46] J. Zhang, W. Ma, J. Lin, L. Ma, and X. Jia, *Fault Diagnosis Approach for Rotating Machinery based on Dynamic Model and Computational Intelligence*, Measurement, vol. 59, pp. 73-87, 2015.

Vehicle-to-Person Interaction: A Survey

Carlos Palacio¹, Eric Gamess²
cp1ucv@gmail.com, egamess@jsu.edu

¹ School of Computing, Central University of Venezuela, Caracas, Venezuela

² MCIS Department, Jacksonville State University, Jacksonville, Alabama, USA

Abstract: Our society requires the usage of roads and highways, among others means, to move a high amount of objects and living beings every day. Therefore, it is very challenging to preserve the safety when fast and powerful vehicles have to share these crowded public ways with slow and vulnerable subjects. Fortunately, the trend is that regulating authorities are introducing technological advances on new and existing structures, so that automotive vehicles and other users of public ways can coexist together, with a certain level of safety.

In this work, we make a survey of the previous situation, focused on the case of the relationship between pedestrians and automobiles, and we present the current technologies available in this field of research.

Keywords: Vehicular Network; Intelligent Transportation System; WAVE; V2V; V2I; V2P; V2X; Vulnerable Road Users.

I. INTRODUCTION

History is strongly related to efforts to supply solutions to common problems of human beings. There are plenty of examples: the invention of fire, wheel, trading, cities, etc., sought to make human life more comfortable. Cities are a remarkable invention that changed life drastically over the planet, bringing comfort and safety to their residents. Living in a city carries sustainability problems too, although not only limited to urbanization, but rather as the results of poor exploitation of urban aspects [1].

Similarly, while transportation evolved from riding tame animals to complex motor-driven vehicles, it was yet necessary to enhance the design of vehicles to increase the experience of drivers and passengers with machinery. Many technologies have been used to improve the interaction between drivers and interior car compartments, to reduce fatigue and enhance comfort, including the development of several sorts of electronics and electro-mechanical devices, sensors, software, and innovative new materials [2-4]. The science of “ergonomics” helps in the design of products and systems for the interaction between machines and the people who use them. Along with many measures to reduce road traffic deaths and injuries, protecting car occupants, “ergonomics” contributes to upgrading the human-machine relationship.

Notwithstanding this scientific and technical effort, 1.35 million people die on the roads worldwide every year, and as many as 50 other millions are injured [5]. It is worth mentioned that 23% of these deaths are pedestrians, 3% bicyclists, and 28% two- and three-wheelers; thus, more than a half of those killed and wounded in traffic crashes around the world are the

so-called “VRUs” (Vulnerable Road Users): pedestrians, cyclists, mopeds, motorcyclists and passengers in public transport [5]. According to [6], the risk of dying for pedestrians and cyclists due to street incidents is about 8 or 9 times higher than that of the occupants of motor vehicles. Moreover, the most significant part of these accidents is due to the collision of the VRUs on the front parts of motor vehicles: hood, grill, lights, and bumper. Beyond the suffering, a road crash traffic can take survivors into poverty, and their families to face the long-term consequences, including the medical, rehabilitation, and funeral costs, and in many cases, the loss of the family’s financial supporter. Therefore, in safety and economic terms, there is no difference between a driver, a passenger, a pedestrian, and another human sharing the way with vehicles, beyond their specific role in the road, in a particular moment.

Initially, road constructors focused their attention on the needs of motor vehicles, and VRUs were neglected. Roads were built wider and redesigned due to the increasing number of vehicles. Pedestrians and cyclists were invisible, except when authorities intentionally restricted their movements to ease the flow of motor vehicles. With these limitations, the risk for pedestrians and cyclists to become a victim of traffic increased dramatically [7]. At the end of the 1970s, a reversed trend began to appear in some European countries: reduction of traffic of self-propelled vehicles, redistribution of the streets, more and better public transport, improved facilities for pedestrians and cyclists, and the acknowledgment that the roads were not only for cars, but also for pedestrians.

One of the lines of action consisted in focusing on human behavior, as the primary cause of road traffic crashes and incidents [5]:

- Drinking increases the risk of involvement in a crash. The World Health Organization (WHO) recommends a limitation by law of no more than 0.05 g/dL of BAC (Blood Alcohol Concentration) for experimented drivers, and 0.02 g/dL for commercial, novice, and young drivers
- Maximum car speed in urban areas should not exceed 50 km/h in general, and not exceed 30 km/h in areas with high pedestrian activity. And should be even lower near places with people with reduced abilities, like hospitals and schools
- Use of devices such as helmets and seat-belt must be mandatory
- Application of restrictions for children (child seats for infants, booster seats for older children, and the banning of children in front seats).

In the 1980s, the idea of comprehensive road networks for pedestrians and cyclists was introduced. Some countries began to take measures prioritizing the needs of VRUs, and recognizing the importance to build protective environments when making political and planning decisions:

- Building specific pedestrian and/or bicycle-only routes
- Demarcating pedestrian and/or bicycle lanes, tunnels, and car-free play areas
- Reducing speed in certain areas where VRUs are most exposed to car hazards
- Excluding cars from the city center at specific times
- Developing high-capacity public transport systems.

Looking at the current deployment state, it can be seen that these measures have not been enough, and several factors could get this situation even worse. The migration of people from rural areas to cities and the aging of the world population put every year more VRUs with reduced abilities in the ways.

While industry invests massive amounts of resources improving safety and other characteristics of vehicles to make them more attractive to buyers, there has been a historical lack of investment in enhancing the security of VRUs. Therefore, it is imperative to build safer vehicles and roads, and improve the relationship between vehicles and every kind of VRUs, particularly in aspects around safeness. All these concerns encourage the development and application of innovative technologies. Therefore, it is the topic of this study: the safety of VRUs.

The rest of this paper has been structured as follows. Section II introduces concepts related to vehicular networks, while Section III justifies its usage. Section IV delves into "pedestrian behavior". A study of Vehicle-to-Person networks technology is done in Section V. Finally, Section VI finalizes the paper with the conclusions.

II. VEHICULAR NETWORKS

Progressive vehicular technologies seek the convergence between the needs of drivers, transport authorities, and VRUs, bearing in mind the environmental issues of current society. This convergence looks for the development of new efficient and reliable transport paradigms, resulting in a new "smart" transport model known as the ITS (Intelligent Transport System). Among these new paradigms is the protection to

VRUs areas, using inputs from several fields of research, e.g., smart and green cities, data communication techniques, and "Vehicular Networks".

A vehicular network consists of moving vehicles that act as mobile computing platforms, similar to laptops or cellphones but with very much faster speeds of displacement, within an optional infrastructure of mobile and fixed-location resources, and form together a source of data traffic of heterogeneous nature. The goal of the vehicular network is to connect vehicles spontaneously between themselves and the road resources, through short-range wireless network available devices, creating a combination that allows a car to interact with other cars and with local or remote services, such as traffic and emergency information, infotainment, and legal issues, among others [8].

Vehicular networks will be the communication basis of the ITS, delivering services of diverse characteristics to drivers and passengers, thus attracting considerable attention from the research community and the automotive industry [9]. Road safety, traffic information and optimization, self-driving, and parking assistance are the main issues that motivate the ITS, but this new technology will also offer a wide variety of benefits to car occupants, including web, music, and multimedia contents, network games, access and transfer of files, communication with their home network, access to business and job-related resources, communications with other drivers, and even with pedestrians.

The heterogeneous network scenario of the vehicular networks allows a varied architecture for the infrastructure in highway, rural, and urban environments; it can be built with wireless hot-spots along the road, integrated into the existing cellular systems, included in traffic signals, or deployed separately. Thus, the design, deployment, and operation of the infrastructure could be executed in several ways, by network operators, ISPs (Internet Service Providers), private integrators, and/or governmental authorities. Moreover, vehicles can communicate directly or indirectly with other vehicles without the need for the infrastructure, using WiFi or WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment), for example. To this end, vehicles must cooperate and forward information on behalf of each other.

Vehicular networks are a trend today not only between scientists and engineers, but in societal leaders too, in their desires to give proper tools and directions to the evolution of the local national transport system. The current human society asks for communication technologies that facilitate connectivity to the transport actors, meaning not only users, but vehicles and infrastructures too.

The ITS can collect and deliver data from different heterogeneous sources (e.g., smart cities, smart roads, and smart vehicles), with new "smart" communication technologies, e.g., V2V (Vehicle-to-Vehicle), V2I (Vehicle-to-Infrastructure), and V2P (Vehicle-to-Person), just to mention some of them. Finally, all of them will converge in a broader heterogeneous platform denominated V2X (Vehicle-to-Everything), with the requirements of developing devices, services and applications that will facilitate and enhance safety and social interactions [10]. The V2X connection will mean a totally connected vehicle, able to communicate with every

object around, near and far from itself: traffic lights, other vehicles, toll gates, parking meters, VRUs, and pets on the road. Moreover, office resources and home information will be remotely reachable from an ordinary car.

The communication system of a car can be divided into in-vehicle and out-vehicle communications. The in-vehicle communication takes place between elements of the same car. According to the intended use of communications technologies, the future V2X market can include:

A. IN-V (*In-Vehicle Communications*)

The car itself is equipped with numerous sensors managed by local controllers that are now connected together with standards buses, replacing the legacy proprietary connections that were used formerly. These systems are running on communication architectures with different types of buses such as CAN, LIN, FlexRay, etc (see Table I), enhancing the perception of the driver and providing different functionalities from advanced control to entertainment [11].

Table I: Primary Use of Different Buses in Automotive Applications

	Feedback Control	Discrete Control	Diagnostic & Service	Infotainment & Telematics	Maximum Speed
CAN	Primary use	Primary use	Primary use		1 Mbps
LIN		Primary use			20 Mbps
MOST				Primary use	20 Mbps
FlexRay	Primary use				10 Mbps
TTP/C	Primary use				25 Mbps
TTCA	Primary use				1 Mbps

Some feedback and control functions can include a wide variety of operations from switch-on and switch-off devices or lights, automatic action of wipers, diagnostic from the engine and drivetrain sensors, and commands over the mechanics and electronics of the vehicle, e.g. engine control, ABS (Anti-lock Braking System), ESP (Electronic Stability Program), and anti-roll system. Furthermore, comfort functions embrace cruise control, steer-by-wire, and infotainment applications (e.g., Internet connection, music, and video).

Finally, the IN-V network must provide functionalities during the life of the vehicle, including in diagnostics and service stages, and access to telematics of the vehicle, that is, the set of functions that uses networks outside the vehicle to perform tasks like communications and environment sensing [12].

B. V2V (*Vehicle-to-Vehicle*)

In V2V, messages are transmitted from one vehicle to another one. They can carry information from near and far sources. Near source data usually come from the environment, and are related to alerts and warnings in the pathway. It is absolutely vital that this kind of data travels as-soon-as-possible since nearby moving objects can be in danger, or can be a source of danger to other objects, due to road accidents, road obstructions, and approaching emergency vehicles. On the other hand, far source data are frequently related to the Internet. Their delivery is not normally an urgency issue, since they mostly deliver e-mails, web browsing, data storage, and

multimedia applications [13]. Direct V2V communications have the advantage of no need for an external support (i.e., an infrastructure), but has a distance limited to the propagation range of the signal; hence, the ITS answer is based on hops, in a cooperative form. This collaborative routing has to deal with network delay and latency to make them acceptable for alert messages delivering, under unpredictable size, form and density of the dynamic topology, and fast-changing weather conditions.

Handling communications and safety in vehicles that share a via and infrastructure, at high speed, and under uncertainty of routing, weather, etc. is not trivial. Hence, this area of development must be grounded over reliable and robust wireless communication mechanisms that also minimize the administrative overhead. This has led some countries around the world to invest in research programs. In Europe, the main programs are the EU “Intelligent Car Initiative” and “CAR 2 CAR Communication Consortium”, where the latter is driven by the industry [15][16]. In the USA, the Intelligent Transportation Systems Joint Program, a program of the US Department of Transportation opens to private collaborations, formerly known as VII (Vehicle-Infrastructure Integration) [17][18]. In Japan, the ASV (Advanced Safety Vehicle) [19] program is already in its sixth phase. Germany [20] is also well positioned with the integrated statecraft for the development of the new driving technologies.

These initiatives have generated technologies that are currently in use, like ACC (Adaptive Cruise Control), Lane Keeping Support (LKS) system, ABS (Anti-lock Braking System), Curve Overshooting Prevention support system, Night Time Forward Pedestrian Advisory System, Stop-and-Go system, AEB (Autonomous Emergency Braking) system, and Emergency Braking Advisory system [21][22].

C. V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*)

Under this scheme, vehicles and roadway elements (called infrastructure, in general) exchange several sorts of data, including critical safety and operational data. The primary goal of this exchange is to avoid motor vehicle crashes, but it should not be limited to this area. In 1984, a communication protocol named RDS (Radio Data System) enclosed small amounts of data in FM radio broadcasts, becoming the first I2V (Infrastructure-to-Vehicle) communication system [14]. The nomenclature I2V and not V2I corresponds to the fact that this system was unidirectional from the infrastructure to vehicles, and there were no communications from vehicles to the infrastructure. In 2005, a new version of RDS included TMC (Traffic Message Channel) was released, and consisted of messages with events and location codes, expected incident duration, affected extent, and other details.

In V2I, each vehicle should be equipped with an OBU (On-Board Unit), which collects the IN-V sensors data, transmits them through a transponder, and interprets the incoming messages from its environment (infrastructure, pedestrian, other vehicles, etc.).

D. V2P (*Vehicle-to-Person*)

V2P also stands for Vehicle-to-Pedestrian or for Vehicle-to-Pets, and facilitates the integration of VRUs to roads and sidewalks, by offering communication to/from the vehicles,

to/from the people, and to/from the pets, ensuring by this way the safety to VRUs.

On the one hand, vehicles must be equipped with the new standards. On the other hand, VRUs must carry some sort of wireless communication devices (e.g., smartphones or collars with a transmitter). In the near future, it is desirable that small devices, like smartphones, incorporate DSRC [98] (Designated Short Range Communications) technology. With DSRC, GPS and local sensors, it will be possible to find out the exact location of VRUs. Current smartphones have WiFi technology, enabling anyone with a smartphone to receive and send this kind of messages from/to vehicles around, with the proper software. Some carmakers have this approach ¹, but traditional WiFi was not designed for high-speed mobility; hence it is not efficient for vehicular networks. Other carmakers prefer DSRC/WAVE and fusion the data from sensors and GPS to determine the exact location of partakers; in the pedestrian side, software will show warning and alerts on the device (e.g., the smartphone) while the infotainment system screen will do something similar on the vehicle side². Additional measurements, such as AEB (Autonomous Emergency Braking), can be taken to reduce the chances of a collision.

E. Other Technologies

Ceaseless advanced research is currently working over other technologies of recent creation:

- V2M (Vehicle-to-Motorcycle) and B2V (Bicycle-to-Vehicle) share a similar approach to V2P, because both are aimed to VRUs safety and share similar tools.
- V2A (Vehicle-to-Application) embraces a limitless variety of applications that can support people in an automobile, monitoring the driving behavior for the safety of the vehicle and passengers, reporting relevant messages, sharing information and control, in and out the vehicle, etc [23][24].
- V2H (Vehicle-to-Home) and its related schemes V2B (Vehicle-to-Building), and V2C (Vehicle-to-Community) deal with techniques to deploy, manage and access electrical power systems for electric vehicles, in interest to reduce oil consumption and contaminant emissions [25-27].
- V2G (Vehicle-to-Grid) and its related V2L (Vehicle-to-Location) embrace the bindings between home power-producer systems like electric cars, solar panels, windmills, etc. to a company's power grid. It departs from the idea that a small power producer could be self-sufficient and autonomous from the grid, and even could become an electricity provider generating revenues through smart charging and trading of electricity. In practice, this scenario is currently only adopted by a small group of technology enthusiasts, among other reasons, because usually there is a wide variation between the amounts that companies charge, with respect to what they pay to the small producers. Currently, electrical cars manufacturers support this innovative technology for vehicle charging, through charging station networks, like Tesla [26][28-30].

¹ http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Jul/0726_pedestrian.html

² <http://quartsoft.com/blog/201309/honda-v2v-v2p-technology-smartphones>

III. MOTIVATION OF V2V AND V2I COMMUNICATIONS

As can be seen, safe navigation has been the first motivation behind V2V and V2I communications. Posterior applications embrace many fields [31-54]:

- Traffic Signals: Time of signaling can be augmented or shortened according to vehicular and pedestrian traffic.
- Managed Lanes: The technology enables the management of configurable lanes. Therefore, HOV (High-Occupancy Vehicle) lanes, toll lanes, reversible lanes, and emergency lanes can be reversed, opened, closed, changed, and cleared, in realtime.
- Transit Stops: Mobile devices can interact with stops of public transport services, like buses. If no passengers are waiting, the bus driver can avoid unnecessary stops, or simply omit the station.
- Electronic Toll: Electronic toll collection and electronic payment applications reduce costs and time for both sides, the driver and the transit authority.
- Anti-Bunching: Bunching means that several vehicles of the same kind/route get lumped along the way. Intercommunication ensures to travel evenly spaced.
- Dynamic Rerouting: A vehicle can know about congestion many kilometers away, and take the adequate action such as an alternative route.
- Early detection of accidents: Operators of Emergency Services can detect the exact places of incidents quickly after the occurrence from a long distance, and act without delay.
- Location of stolen/suspicious cars: The infrastructure network acquires data when a car passes by the Road-Side Units (RSU), and sends this data to be processed at a higher level. According to the result, an alert can be sent to the respective authorities.
- Accident Reconstruction: Investigators of insurance companies or police can inspect post-accident information registered from sensors and stored in by the on-board computer to check road conditions, neighbor cars, and other factors for forensic reconstruction of road accidents. Moreover, the information stored will also help to judge the driving behavior of the driver at the moment of the accident.
- Pollution Control: Transportation is one of the main sources of greenhouse gas emissions. A percentage of these emissions are due to unstable speed profiles and excessive acceleration. ITS technology can be effective in improving driving conduct, in terms of smooth speeds and acceleration rates by providing real-time traffic information.
- Parking Assistance: Reduction of wasted time when cars are cycling for a parking slot means a reduction of fuel consumption too. The parking-assistance devices send signals pointing out the available places.
- Office-on-wheels: Conventional office applications like writing reports, downloading files, and reading e-mail are combined with movies and multimedia in a new environment: the car. This will allow the passengers of a vehicle to work even when they are stuck in a traffic jam or just enjoying a highway ride.

- **Infotainment:** Mobile Internet games, mobile shopping, and location of local services will make cars with wireless communications not only more integrated with the world, but also will become an aim for advertisements.
- **Telemetry:** Performance measurements, and in general, any sample from IN-V sensors can be directed to servers to record and/or analyze the performance of a subsystem in the cars or the behavior of an environmental factor. Insurance, mechanical services, and rental companies can evaluate these measures in their central servers, and take the corresponding actions. National weather services will take advantage of external thermometers and humidity sensors to forecast the weather.

Currently, these systems are being simulated on computers, and tested on roads designed and built for this purpose. The outcome of this research will determine how technology can prevent accidents in the ways, enhance the traveling experience, keeping in mind that transportation services include the movement of people, live creatures, and goods. Information that is gathered in tests will help to choose which safety features will be compulsories in every future vehicles [55-58].

IV. PEDESTRIAN BEHAVIOR

Human beings are naturally endowed for walking. Thus, in ancient times, walking was their unique transport means. Later came tame animals, mechanical devices, and electro-mechanical devices, so currently walking is relegated mainly to indoors, and to relatively short distance displacements; in spite of its restricted use, worldwide, every year about 400,000 pedestrians lost their lives in clashes associated to automobiles. The danger increases with age: nearly half of these pedestrian fatalities in Europe imply elderly pedestrians. Avert this kind of crashes has therefore become the focal point in plenty of investigation, generating new branches of study among the Computer Science field [59][60].

It is usually thought that walkers are to be blamed of these incidents, because they supposedly have a lower priority in the use of streets [61]. And it happens since chariot's time, before the invention of motorcars, as a lawyer, Mr. Justice Mellor, stated in 1869:

“Accidents happen because the drivers do not believe, or at any rate, will not admit, that foot-passengers have as much right to cross a street or thoroughfare as persons driving have to pass along it.”

Then came studies about pedestrian behavior. Their primary goals were to obtain data to design traffic regulations and, accordingly, pedestrian safety protections. Lately with the advent of computers, computer simulations arrived along-side the pedestrian models. A computer simulation is an algorithm based in a mathematical model, that using a numeric method replicates the acts and facts of a studied system, ranging from basic science through social and economics. In countless situations, its contribution is irreplaceable, because in many areas, such as astrophysics, engineering, physiology, and climatology, there are phenomenons that are impossible to reproduce, or at least, not possible to reproduce without harming some systems [62-64].

Currently, the pedestrian computer simulations are considered an imperative prime appliance to study living subjects conducts and design proper pedestrian facilities, in spite of the opinion of social psychologists that consider mathematical modeling a “reductionist” approach, especially because of its lack of social patterns. The field of action of these psychologists can be seen as an open system where elements change their behavior upon changes of circumstances around them; thus, the modelers must develop techniques that include multiple and circumstance-variable conditions, and separate the components of the problem, to adequately represent these scenarios and the dynamic roles of the elements (see Figure 1). Subsequently, road proponents could bring on better-designed pedestrian facilities [65][66].

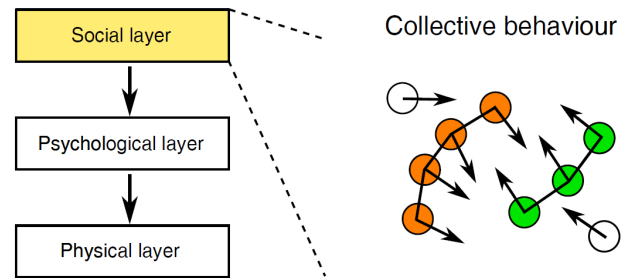


Figure 1: Separation of the Model in Three Layers. The Social Behavior (Yellow) is Studied Apart

A. Characteristics

To drive these studies, characteristics of pedestrian behavior must be considered [67-75]:

- **Stop and parking:** Walking is not constrained by road infrastructures; even more, living beings can stop at any time, and at places where they are not supposed to stop. Moreover, living beings do not need to park.
- **Route:** Routes of pedestrians are altered irregularly because they have to react to rising obstructions, the environment, and a cellphone interaction. Furthermore, they can cross the street where it is not supposed to be allowed.
- **Predictability:** Pedestrians do most of their socioeconomic transactions on foot at any place, making their conduct pretty less foreseeable than drivers' ones. In the case of animals, their behavior can even respond to physiological needs, at any place.
- **Size:** Vehicles need a very well-defined space to drive and to park. In contrast, pedestrians require a minimal, and in certain conditions compressible, space to behave. In some studies, this property is compared with complex fluids or rarefied gases.
- **Speed:** Pace of pedestrians derives from several factors that include: (1) extension of city and/or distance to travel, (2) environment (weather, lighting, and way conditions), and (3) own conditions (purpose of the trip, age, and physical conditions).
- **Gap Acceptance:** Is a subjective criterion of how safe it is to cross the street using the gap between the last and the coming car. This subjective calculus reduces the options to

seconds, or even fractions of seconds in the extreme scenarios.

B. Studies

Modern conveyances and sedentary life affect human health, so walking is a prophylactic measure. Also, as stated previously, pedestrian activities bring them to share the roads with vehicles, thus these activities have to be studied to warranty their safety.

Empiric observation is the most used method to gather behavioral data that are mathematically studied. In terms of probabilities of pedestrians walking in response to stimulus or mandatory acts, like crossing in the marked crosswalks, or crossing at the indicated time, values are measured in function of delay and/or time-of-arrival [76].

Modeling methods can be roughly divided into two kinds: macroscopic and microscopic models. These two models have very differentiated features. Macroscopic methods study living mass along the time, considering groups of pedestrians as a whole, and consequently ignoring interactions between individuals [77][78]. These models have better computational performance because they assume that this “mass” or population is comprised of homogeneous agents; but are far from representing adequately real-world situations. On the other hand, in microscopic models, the focus relies on the behavior of individual elements representing living beings, as well as the effect of every element on others around themselves. While microscopic models can represent precise pedestrian behaviors in a wider number of situations, this level of detail needs more computational resources, and thus slows down the computational processing speed [79][80].

Due to their high degree of details, microscopic models have become the best suited to represent the behavioral rules that each entity applies, and to identify the interactions among them too. V2P (Vehicle-to-Person) studies focused on the networking part rely mainly on this kind of models [81].

C. Tools

For humans, detect and correctly decode the shape and behavior of a living being is intuitive and can be considered as easy. However, in the field of computers, it has been hard to represent the conduct of people due to the lack of good models and the required computational power. The available computational resources restraints the capacity of correctly allocate a group of living beings sharing the environment with vehicles and inert objects, at least in an enough small portion of time. There are too many parameters, not only silhouette, surface, color, pose, lighting, and separation from the background that computers must calculate, but also factors such as speed, acceleration, direction, uncertainty, etc. Furthermore, this environment is ever changing and a bounded simulation time is vital; machines should correctly position VRUs at least in real-time, so drivers and on-board computers can avoid crashing against them with enough time ahead [60][76].

The variety of resources that have been used to provide a measurement for active pedestrian acts is very wide and includes LOS (Line of Sight) types, N-LOS (Non-Line of Sight) types, and several other techniques mainly derived from video sources [82-86]:

- LOS: such as laser, radar, and GPS. GPS is particularly useful in rural and suburban environments, where other technologies cannot reach, but is less recommended in highly dense areas, due to its lack of precision.
- N-LOS: such as 3G telephony, WLAN, and RFID (Radio Frequency Identification). The RFID-based methods have severe limitations, in range and in the disposition of pedestrians to carry an additional device. 3G must rely on the surrounding resources, while WAVE (a WLAN) can work in an autonomous way.
- Other solutions include video detection and analysis that are already present in many high-end cars, and in the use of the front and rear cameras of a smartphone, in the case of pedestrians. Both share the aim to alert and avoid a crash, but there is a big difference between them because in a car this technique represents just another source of electric and computational drain, but in a pedestrian, these drains can result in the discharge of the battery and the occupation of the scarce computational resources (processor and memory) that could make this approach impractical.

The objective of this variety of technologies is to operate concurrently for an “ideal” solution that:

- works outside and inside particular portions of ways like bridges, tunnels, etc.
- positions the objects accurately.
- gives information in real time, or even better, make prediction.
- is ubiquitous, that is, every vehicle and VRU must have the solution; and ideally, the infrastructure (road) also has it.
- works in any weather condition (e.g., fog, rain) and any lighting condition (sunny, cloudy, night).

These solutions must be concurrent because currently there is not a technology that solely has all the advantages, without any limitation. Taking the GPS for example, it is universal. It works in any place around the world, and most smartphone already has it. But its strong dependency of Line of Sight (LOS) to the satellites continues being a major problem. Also, GPS suffers the problems of its high dependency on processing and lack of precision. Hence, if the satellite system is used for positioning, it needs help from other technologies, such as sensors, Bluetooth, WiFi, and video; all together with the proper software that coordinates and calculates positioning approximation.

An enhanced scenario includes the fusion of information from two devices of different philosophy of work [87-89]:

- A positioning system using signal strength, i.e. RSS (Received Signal Strength), supplemented with some kind of motion embedded sensor, i.e. INS (Inertial Navigation System) to position a smartphone/vehicle.
- An embedded sensor, complemented with an embedded camera to surely position other users, devices, or vehicles. This is the approach used by Tesla Motors in its software.

Nevertheless, accurate ubication has been achieved in two dimensions. Including a third dimension would be very useful to determine positioning in bridges, tunnels, and buildings. In

the future, the use of sensor networks, NFC (Near-Field Communication), and Bluetooth installed in the environment will ease positioning [90].

D. Outcomes

Any study about humans is a complex problem; to adequately represent elements in the system, examinations must include classifications according to sex, age, economic status, geographic location, and every other relevant detail. Then comes statistical processing. If to that complexity, we add the unpredictable nature of humans when making decisions, modeling of pedestrian behavior tends to be a pretty tangled one. Thus, scientists need to know every detail about mechanisms used by pedestrians when they decide their next movement in an range of conditions and situations, e.g. from young and elderly pedestrians, corner and mid-block crossing, and marked or unmarked crossing, because traffic accidents concerning pedestrians are a public health problem, when interacting with motor vehicles [91][92].

Technologies that can help to collect information about pedestrian behavior have not been deployed sufficiently, whence generating a deficiency of data; whereby many researchers center their indicators on macroscopic-modeled results. With the advent of better (and better deployed) technologies that augment granularity and accuracy of data, the outcomes of studies will reveal very useful knowledge that will help to avoid accidents, diminish the number of injured persons, and save lives. Present outcomes from actual studies exemplify details of several aspects of this subject area [93][94]:

Environment:

- (a) Roadway characteristics such as average daily traffic volumes, speed limit, number of lanes, and land use patterns around the crossing have been shown to have an impact on pedestrian crash rates.
- (b) Longer crossing distances and crossings with more lanes can be more dangerous than narrower crossings.
- (c) Sidewalks tend to decrease crash rates.
- (d) Urban areas have higher crash rates than rural areas, but the number of non-residential driveways within 50 feet of an intersection is positively associated with pedestrian crashes.
- (e) Neighborhoods with low and median annual income, and proximity to alcohol sales establishments are associated with elevated crash rates.
- (f) Higher crash rates occur around malls, schools, and parks.
- (g) The number of commercial retail properties within 0.1 miles of the intersection is positively associated with pedestrian crashes.
- (h) The percentage of residents living within 0.25 miles of the intersection that are younger than 18 is positively associated with pedestrian crashes.

Signaling:

- (a) Crash rates increase with the speed limits at uncontrolled crossings.

- (b) Right-turn only lanes are positively associated with high crash rates.
- (c) Median islands and Danish offsets (a pedestrian island in the shape of a “Z” which causes the pedestrian to look in the direction of oncoming traffic before crossing) have been shown to mitigate pedestrian crash rates.

Yielding:

- (a) Drivers are less likely to yield to pedestrians when approaching non-signalized crossings at higher speeds.
- (b) Pedestrian actions are less predictable than those of motorists. Without an adequate infrastructure that protects pedestrians when they pivot, rotate, or change their course, large high-speed roads make it difficult for cars to yield to them, becoming a significant source of pedestrian fatalities.
- (c) Another study at six crossings of varying lane width and speed limits between 25 and 30 mph found that marked crosswalks improved driver yielding rates.

V. VEHICLE-TO-PERSON NETWORKS

For a pedestrian, sharing the roads with vehicles is a dangerous experience. In rural, suburban, and even in many cases in urban environments, people must abandon the footpath or sidewalk to move on foot directly on the roadway, exposing themselves to be run over by a car. Even further, walking, standing, or sitting in the sidewalk does not warranty safety for pedestrians: at any moment, a vehicle can invade the footpath and cause severe injuries or the death of that person. This situation has been aggravated with the appearance of mobile devices like smartphones, tablets, and handy video games, which are distracting elements that decrease the time of reaction of pedestrians against dangers [82].

Since the very beginning of the automotive industry, authorities have tried to organize traffic. The first traffic light appeared in London, England, in 1869, giving the pedestrians 30 seconds to cross the street every 5 minutes. But from that very beginning, problems started too. Neither pedestrians nor carriage drivers always obey the signal. Thence, from those old times, authorities studied alternative resources. In the mentioned case, the final decision was to dig several pedestrian tunnels to help safely crossing streets. Not many posterior efforts for pedestrian security were made, because automotive traffic had and has a supposed superior level of importance than pedestrian one, as was mentioned previously. Because the psychology and behavior of drivers had not been studied enough, regulatory efforts frequently aimed to not-so-clear targets, as this statement in the upper chamber of England in 1938 illustrates [61]:

“We (pedestrian) do feel that if subways and bridges were put into general operation, it would only confirm the view of the motorist that the public highway was a motor speed track and would lead to further accidents”

As time passes, and human society has been supported more and more by automotive vehicles to develop its activities, the first concern to appear were the killed and injured passengers inside vehicles, whereby the first safety measures were taken to protect them. But as more and more accidents involved VRUs, it became evident that they need protection too. This protection

started in the car itself. Its structure began to be designed or covered with bonnets and bumpers to passively diminish the impact of a hit, when a pedestrian faces a crash [95-97].

In a vehicular network, vehicles are equipped with wireless interfaces that can include Bluetooth, IEEE 802.11a/b/g/n/ac (WiFi), IEEE 802.11p (WAVE), and LTE (Long Term Evolution), among others.

For V2V communications, many transmission technologies are available and include the use of infrared beams, VHF waves, microwaves, or DSRC [98] (Dedicated Short Range Communication), among others. DSRC was defined by the US FCC (Federal Communications Commission) as a specific communication standard for ITS use, designed to meet the extremely short latency requirement for road safety messaging and control [98]. It works on the WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) 5.9 GHz band standard, can reach near 1 km range in the best case, allowing communications between vehicles with speeds not superior to 160 km/h, and has a relatively low latency of 50 ms. DSCR is designed in a simple way: OBUs (On-Board Unit) and RSUs (Road-Side Unit). The RSU emits announces to OBUs and other RSUs, approximately ten times per second. Receivers listen warning and safety messages on the control channel, authenticate sender digital signature and execute applications giving priority to safety ones. IEEE 802.11p, an approved amendment to the IEEE 802.11a standard to use a WiFi alike technology in vehicles, takes charge of PHY and MAC WAVE layers. IEEE 1609.2, IEEE 1609.3, and IEEE 1609.4 work in superior layers of WAVE [99]. It will probably be one of the main supports of the ITS, so the near future's tendency is to make wireless technology more accessible, ubiquitous and inexpensive, which in turn will foment the appearance of numerous innovative vehicular applications. Moreover, future compulsory requirements for installing DSRC modules by US NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) in new vehicles in the USA market will accelerate even more this tendency³.

Statistically speaking, the majority of accidents are due to human mistakes made inside and outside the vehicles. In this order of ideas, many incidents would be avoided, or their consequences minimized if vehicles were equipped with adequate technologies that could [60][100-102]:

- detect a person (or other moving subject) in order to activate safety systems to avert an accident. Depending on the situation, these safety systems could totally avoid the crash. In other cases, they would try to avoid the collision but will only reduce the impact.
- analyze the situation fast enough to alert the driver and simultaneously take necessary actions to prevent the crash. In this scenario, fast means real-time, or even quicker, by predicting dangerous scenes.
- release the driver of the responsibility of driving. Or limit his/her duty with some mechanisms that restrict his/her responsibilities, cutting off this power of driving, and others controls, and transfers this power to some algorithm that takes the control, to avoid the crash.

The control means to have “eyes and ears” to detect the pedestrian and his/her environment. Beyond the theory of the largely studied methods to determine distances and positioning, like trilateration, triangulation, ToA (Time of Arrival), AoA (Angle of Arrival), and RSSI (Received Signal Strength Indicator), among others, the eyes and the ears of any vehicle means information sourced [104-106]:

- locally from sensors: such as IR (Infrared), laser, and radars embedded in the vehicles' structure. The restriction of sensors is the distance, worsened by varied obstacles in the form of climate, curves, trees, walls, electromagnetic noise, and so on.

Especial mention is reserved for digital video cameras, a form of sensors whose outcome need to be adequately studied by the on-board computer powerful enough to do the additional job of analyzing and interpreting the video frames, and to give valuable information so quickly that it can be useful; a delay in any of its stages would make this information useless.

- externally from the network: from the infrastructure of the roads, and from other vehicles. The ITS propounds DSRC, the technological platform that uses WAVE. But, because of the scarcity of bandwidth in the 5.9 GHz band presently assigned to WAVE, and the very limited number of devices currently using WAVE, communicating alternatives, like WAVE using LTE 5G, are necessary.
- externally from people/pets: on the pedestrian side, it should exist at least an equivalent mechanism to alert the proximity of a vehicle. Direct and full-duplex connection from cars to pedestrians, using the proposed and already-used technologies including Bluetooth, RFID, ZigBee, and even WiFi, should imply many advantages as fast notification and accuracy. As it means that pedestrians should carry battery-powered equipment for their safety, it is logical to suppose that the same reasoning is applicable to pets and other animals. Currently, naturalists apply sensors to wild animals to study migrations, habits, and population size. Hence, the acronym V2P for Vehicle-to-Person can be extended to Vehicle-to-Pet. If the carried-on device is IEEE 802.11p compatible, it would be a major integration in the vehicular network world, given the already present GSM/LTE technology in many modern vehicles.

In general, an ideal V2X must position every actor: living or inanimate, mobile or fixed, rolling or walking. The indirect approach consists of: pedestrian first connects to the infrastructure, and the vehicle gets the position of pedestrian from it. A direct approach is desirable. To this end, it is necessary to integrate WAVE to the devices carried by pedestrians (e.g., smartphones). A complete integration of pedestrians into the ITS would offer numerous benefits and applications to every actor of the roads. It is very likely that the penetration rate of the WAVE technology on the pedestrian side is going to be faster than in the vehicle side, as the lifetime of mobile devices is shorter than cars' one. Averagely, a mobile phone lasts 18 months, but the lifetime of a car is for several years. In this way, a distracting and entertaining phone can become a solution, by notifying its owner of unsafe situations. As proposed in [82][102][107], the integration of IEEE 802.11p on the VRU side should be compulsory.

³ <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication>

Rules of design in urban and extra-urban environments must evolve to fit all their population [63][64]:

- Humans: Where both extremes of ages, children and elderly, are the most vulnerable. Intelligent Pedestrian Traffic Signals (IPTS), dedicated transportation, and surveillance for personal safety are a good complement, but are not enough. A more radical approach is to diminish superficial traffic as much as possible, to get a more walkable city⁴.
- Animals: A simple IEEE 802.11p compatible collar for pets would be a nice start, but it would only apply for animals that have an owner. Thus, a public service would be necessary to equip big wild animals with probability of crossing a road, if we want to avoid crashes between animals and vehicles.

VI. CONCLUSIONS

Due to the number of fatalities in road accidents, traffic authorities are committed to reduce road crashes. The technologies that can improve public safeties will follow the same path of the seat belt: they will become compulsory. A big effort is required to integrate VRUs into the system, and to improve their safety since they represent the largest portion of the number of wounded and deaths. Up to recently, laws and research tended to strengthen the security of cars, resulting in the development of technology to make cars safer; However, the security of VRUs has become a priority worldwide, and this tendency is irreversible. Following the aforementioned tendency, it is expected that a lot of proposals and laws will appear in the near future to protect VRUs. V2P developments will bring new actors to the vehicular network market: clothes, watches, cellphones, glasses, personal accessories, pet accessories, and many more.

WAVE is a standard of the IEEE that brings communication to the ITS. It was initially targeted to the physical safety of the drivers and passengers, but the community has already proposed a plethora of applications. Access to services as infotainment, web, and cloud inside the car will explode and require more bandwidth. Whereby, IEEE 802.11p will need an amendment, a major upgrade, or a replacement.

Technologies used to improve the interaction between drivers and cars will become a commodity. Nowadays these appliances draw public attention, but car manufacturers will have to improve these technologies continually, to reach the consumer preferences.

REFERENCES

- [1] P. Rode and R. Burdett, *Cities Investing in Energy and Resource Efficiency*, in *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*, United Nations Environment Program, 2011, pp. 453–493.
- [2] N. Ahmad, S. Kamat, M. Minhat, and H. Halim, *Modeling an Ergonomic Driving for In-car Interaction: A Propose Framework*, in proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, January 2014.
- [3] K. Dama, V. Babu, R. Rao, and M. Rao, *A Review on Automotive Seat Comfort Design*, International Journal of Engineering Research & Technology, vol. IV, no. 4, April 2015.
- [4] D. Cornea, C. Bulei, M.-P. Todor, and I. Kiss, *Introduction of Smart Materials Technology-based Products in the Automotive Industry*, in proceeding of the 3rd International Conference and Workshop Mechatronics in Practice and Education (MechEdu 2015). Subotica, Serbia, May 2015.
- [5] *Global Status Report on Road Safety 2018*. World Health Organization. Geneva, Switzerland.
- [6] N. Cappetti, A. Naddeo, G. Amato, and M. Annarumma, *State of the Art on Pedestrian Safety: Simulation and Design Solution for Automotive Industries*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, p. 27.
- [7] C. Pooley, M. Emanuel, T. Männistö-Funk, and P. Norton, *Historical Perspectives on Pedestrians and the City*, Urban History, 2019, pp. 1–7.
- [8] A. Rasheed, S. Gillani, S. Ajmal, A. Qayyum, *Vehicular Adhoc Network (VANET): A Survey, Challenges, and Applications*, Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities, ed. Springer, Singapore, March 2017 pp. 39-51.
- [9] Y. Su, X. Lu, L. Huang, X. Du, *A Novel DCT-Based Compression Scheme for 5G Vehicular Network*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 11, November 2019.
- [10] R. Marrero, E. Marín, X. Masip, R. Nuez, J. Batle, and G. Ren, *A Smart Drive to Future Transport Systems*, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2014.
- [11] S. von Bausnern and G. Parangi, *Inter-vehicle Communication Trends*, Communications Systems VIII, B. Stiller, C. Tsiaras, A. Lareida, L. Kristiana, E. Grag, D. Dönni, and C. Schmitt Eds. University of Zürich, Switzerland, June 2015, pp. 29-52.
- [12] F. Ortiz, M. Sammarco, and L. Costa. *Vehicle Telematics via Exteroceptive Sensors. A Survey*, <https://arxiv.org/abs/2008.12632v1> Cornell University, August 2020.
- [13] R. Shrestha, R. Bajracharya, and S. Nam, *Challenges of Future VANET and Cloud-Based Approaches*, Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 18, article ID 5603518, Wiley, May 2018.
- [14] M. Annoni and B. Williams, *The History of Vehicular Networks*, Vehicular Adhoc Networks, C. Campolo, A. Molinaro, R. Scopigno Eds. Springer, Switzerland, 2015, pp. 3-21.
- [15] C. Zavaglia, *European Union Instruments and Strategies for Sustainable Urban Mobility: Exploiting PUMS and ITS to Develop an Efficient Car Sharing Proposal*, Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 223, Elsevier, June 2016, pp. 542-548.
- [16] K. Sjoberg, P. Andres, T. Buburuzan, and A. Brakemeier, *Cooperative Intelligent Transport Systems in Europe: Current Deployment Status and Outlook*, IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 12, no. 2, June 2017, pp. 89-97.
- [17] *Intelligent Transport Systems Deployment: Findings from the 2019 Connected Vehicle and Automated Vehicle Survey*, US Department of Transportation.
- [18] *History of Intelligent Transportation Systems*, US Department of Transportation, May 2016.
- [19] *Seeking even Greater Traffic Accident Reductions through Vehicle Advancements*, Ministry of Load, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan, October 2017.
- [20] W. Geldmacher, V. Just, J. Kopia, and A. Kompalla, *Development of a Modified Technology Acceptance Model for an Innovative Car Sharing Concept with Self-driving Cars*, in Proceedings of BASIQ International Conference New Trends in Sustainable Business and Consumption, June 2017.
- [21] S. Jeon, G. Kim, and B. Kim, *Braking Performance Improvement Method for V2V Communication-based Autonomous Emergency Braking at Intersections*, Advanced Science and Technology Letters, vol. 86, 2015, pp. 20-25.
- [22] T. Tettamanti, I. Varga, and Z. Szalay, *Impacts of Autonomous Cars from a Traffic Engineering Perspective*, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, vol. 44, no 4, 2016, pp. 244-250.
- [23] H. Chu, V. Raman, J. Shen, A. Kansal, V. Bahl, and R. Choudhury, *I Am a Smartphone and I know my User is Driving*, in proceedings of the 6th IEEE International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), Bangalore, India, January 2014.
- [24] P. Sawant and S. Pande, *A Mobile Application for Monitoring Inefficient and Unsafe Driving Behavior*, in proceedings of the 4th Post

⁴ <https://www.boringcompany.com/faq>

- Graduate Conference, Amrutvahini College of Engineering, Sangamner, India. March 2015.
- [25] F. Giordano, A. Ciocia, P. Di Leo, A. Mazza, F. Spertino, A. Tenconi, and S. Vaschetto, *Vehicle-to-Home Usage Scenarios for Self-Consumption Improvement of a Residential Prosumer with Photovoltaic Roof*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 3, 2020, pp. 2945-2956.
- [26] R. Bohnsack, R. Van den Hoed, and H. Oude, *Deriving Vehicle-to-Grid Business Models from Consumer Preferences*, in proceedings of the 28th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Goyang, Korea, May 2015.
- [27] D. Aguilar-D., A. Dunbar, and S. Brown. *The Electricity Demand of an EV Providing Power via Vehicle-to-home and its Potential Impact on the Grid with Different Electricity Price Tariffs*, in proceedings of the 4th Annual CDT Conference in Energy Storage and Its Applications, Elsevier, Southampton, UK, 2019.
- [28] H. Mehrjerdi and E. Rakhshani, *Vehicle-to-grid Technology for Cost Reduction and Uncertainty Management Integrated with Solar Power*, Journal of Cleaner Production, vol. 229, 2019, pp. 463-469.
- [29] M. Quddus, M. Kabli, and M. Marufuzzaman, *Modeling Electric Vehicle Charging Station Expansion with an Integration of Renewable Energy and Vehicle-to-Grid Sources*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 128, 2019, pp. 251-279.
- [30] M. Taiebat and M. Xu, *Synergies of Four Emerging Technologies for Accelerated Adoption of Electric Vehicles: Shared Mobility, Wireless Charging, Vehicle-to-grid, and Vehicle Automation*, Journal of Cleaner Production, vol. 230, 2019, pp. 794-797.
- [31] J. Kim, R. Saraogi, S. Sakar, and S. Venkateshr, *Modeling the Impact of Traffic Signals on V2V Information Flow*, in proceedings of the 91st IEEE Vehicular Technology Conference, 2020, pp. 1-7.
- [32] K. Huff, J. Matute, A. García, and D. Zhao, *Transit Applications of Vehicle-to-vehicle and Vehicle-to-infrastructure Technology*, Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington DC, USA, January 2015.
- [33] Y. Guo, J. Ma, E. Leslie, and Z. Huang, *Evaluating the Effectiveness of Integrated Connected Automated Vehicle Applications Applied to Freeway Managed Lanes*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020.
- [34] H. Liu, B. McKeever, X. Lu, and S. Shladover, *Early Opportunities to Apply Automation in California Managed Lanes*, University of California, Berkeley, 2019.
- [35] H. Liu, L. Rai, J. Wang, and C. Ren, *A New Approach for Real-time Traffic Delay Estimation based on Cooperative Vehicle-infrastructure Systems at the Signal Intersection*, Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 44, no. 3, 2019, pp. 2613-2625.
- [36] A. Kulkarni and R. Zareen, *A Novel Approach for Intelligent Transportation Systems with Traffic Jam using V2V Communication*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 6, no. 11, November 2019.
- [37] H. Kuang, M. Wang, F. Lu, K. Bai, and X. Li, *An Extended Car-following Model Considering Multi-anticipative Average Velocity Effect under V2V Environment*, Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, vol. 527, 2019, p. 121268.
- [38] E. Suganthi, K. Vinoth, and J. Atul, *Safety and Driver Assistance in VANETs: An Experimental Approach for V2V*, in proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2019), 2019, pp. 397-402.
- [39] A. Alobeidyeen and L. Du, *Interference and Efficient Transmission Range via V2V Communication at Roads Traffic Intersections*, arXiv preprint arXiv:1911.04634, 2019.
- [40] B. Senapati, P. Khilar, N. Sabat, and N. Naba Krushna, *An Automated Toll Gate System using VANET*, in proceedings of the 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP 2019), 2019, pp. 1-5.
- [41] G. Laskaris, M. Seredynski, and F. Viti, *Improving Public Transport Service Regularity using Cooperative Driver Advisory Systems*, Mobilab Research Group, University of Luxembourg, 2018.
- [42] M. Seredynski and F. Viti, *A Survey of Cooperative ITS for Next Generation Public Transport Systems*, in proceedings of the 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2016), 2016, pp. 1229-1234.
- [43] B. Zardosht, S. Beauchemin, and M. Bauer, *A Predictive Accident-duration based Decision-making Module for Rerouting in Environments with V2V Communication*, Journal of Traffic and Transportation Engineering, vol. 4, no. 6, 2017, pp. 535-544.
- [44] M. Won, *A Review on V2V Communication for Traffic Jam Management*, Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communications: A Technical Approach, CRC Press, 2018.
- [45] S. Arnab, *Implementation of Dynamic Vehicular Rerouting, Vehicular Safety and Pollution Reduction Techniques using VANET*, PhD Thesis, BRAC University, Dacca, Bangladesh, April 2018.
- [46] P. Panse, T. Shrimali, and M. Dave, *An Approach for Preventing Accidents and Traffic Load Detection on Highways using V2V Communication in VANET*, JIMS8I-International Journal of Information Communication and Computing Technology, vol. 4, no. 1, 2016, pp. 181-186.
- [47] G.-J. Horng, *The Coordinated Vehicle Recovery Mechanism in City Environments*, Mobile Networks and Applications, vol. 21, no. 4, Springer, 2016, pp. 656-667.
- [48] K. Pinter, Z. Szalay, and G. Vida, *Liability in Autonomous Vehicle Accidents*, Communications-Scientific Letters of the University of Zilina, vol. 19, no. 4, 2017, pp. 30-35.
- [49] W. He, H. Li, X. Zhi, X. Li, J. Zhang, Q. Hou, and Y. Li, *Overview of V2V and V2I Wireless Communication for Cooperative Vehicle Infrastructure Systems*, in proceedings of the IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC 2019), 2019, pp. 127-134.
- [50] D. Möller, R. Haas, and E. Roland, *Connected Parking and Automated Valet Parking*, Guide to Automotive Connectivity and Cybersecurity, Springer, 2019, pp. 485-511.
- [51] C. Chiasserini, F. Malandrino, and M. Sereno, *Advertisement Delivery and Display in Vehicular Networks*, in proceedings of the IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, 2015, pp. 1-5.
- [52] T. Wang, X. Wang, Z. Cui, Y. Cao, and C. Suthaputchakun, *Survey on Cooperatively V2X Downloading for Intelligent Transportation Systems*, IET Intelligent Transport Systems, vol. 13, no. 1, 2018, pp. 13-21.
- [53] S. Reshma and Ch. Chetanaprakash, *Advancement in Infotainment System in Automotive Sector with Vehicular Cloud Network and Current State of Art*, International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 10, no. 2, 2020, p. 2077.
- [54] D. da Silva, J. Torres, A. Pinheiro, F. de Caldas, F. Mendonça, B. Praciano, and R. de Sousa, *Inference of Driver Behavior using Correlated IoT Data from the Vehicle Telemetry and the Driver Mobile Phone*, in proceedings of the 2019 IEEE Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2019), pp. 487-491.
- [55] T. Li, D. Ngoduy, F. Hui, and X. Zhao, *A Car-following Model to Assess the Impact of V2V Messages on Traffic Dynamics*, Transportmetrica B: Transport Dynamics, vol. 8, no. 1, Taylor & Francis, 2020, pp. 150-165.
- [56] J. Maddox, P. Sweatmen, and J. Sayer, *Intelligent Vehicles + Infrastructure to Address Transportation Problems – A Strategic Approach*, in proceedings of the 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Gothenburg, Sweden, June 2015.
- [57] T. Li, F. Hui, X. Zhao, C. Liu, and D. Ngoduy, *Modelling Heterogeneous Traffic Dynamics by Considering the Influence of V2V Safety Messages*, IET Intelligent Transport Systems, vol. 14, no. 4, 2020, pp. 220-227.
- [58] R. Wang, Z. Xu, X. Zhao, and J. Hu, *A V2V-based Method for the Detection of Road Traffic Congestion*, IET Intelligent Transport Systems, vol 13, no. 5, 2019, pp. 880-885.
- [59] R. Poyil, A. Misra, and R. Murugasan, *Pedestrian Safety Modelling and Analysis using GIS in Chennai*, International Journal of Remote Sensing Applications vol. 4, no. 2, June 2014.
- [60] M. Svante, *Image Processing for Pedestrian Detection using a High Mounted Wide-angle Camera*, University of Gothenburg, Sweden, May 2014.
- [61] R. Noland, *Pedestrian Safety versus Traffic Flow. Finding the Balance*, Indian Institute of Technology, Delhi, India, March 2015.

- [62] A. Orlov and I. Ovid'ko, *Mechanical Properties of Graphene Nanoribbons*, Reviews on Advanced Materials Science, vol. 40, no. 3, January 2015, pp. 257-261.
- [63] J. Scholliers, D. Bell, A. Morris, and A. García, *Improving Safety and Mobility of VRUs through ITS Applications*, 5th Transport Research Arena, Paris, France, April 2014, pp. 14-17.
- [64] L. Leden, P. Garder, A. Schirokoff, H. Monderde-i-Bort, C. Johansson, and S. Basbas, *Is ITS the Solution to Creating a Safe City Environment for Children?*, in proceedings of the 16th Road Safety on Four Continents Conference, Beijing, China, May 2013.
- [65] M. Seitz, *Simulating Pedestrian Dynamics. Towards a Natural Locomotion and Psychological Decision Making*, Technische Universität München, Germany, May 2016.
- [66] C. von Krüchten and A. Schadschneider, *Concept of a Decision-Based Pedestrian Model*, Collective Dynamics Journal, vol. 5, Köln, Germany, 2020, pp. 316-323.
- [67] A. Rudenko, L. Palmieri, M. Herman, K. Kitani, D. Gavrilu, and K. Arras, *Human Motion Trajectory Prediction: A Survey*, The International Journal of Robotics Research, vol. 39, no. 8, Sage Journals, 2020, pp. 895-935.
- [68] S. Mamidipalli, V. Sisiopiku, B. Schroeder, and L. Elefteriadou, *A Review of Analysis Techniques and Data Collection Methods for Modeling Pedestrian crossing Behaviors*, Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, vol. 2, no. 2, February 2015.
- [69] S. Xue, F. Claudio, X. Shi, and T. Li, *Revealing the Hidden Rules of Bidirectional Pedestrian Flow based on an Improved Floor Field Cellular Automata Model*, Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 100, Elsevier, 2020, p. 102044.
- [70] W. Wang, J. Zhang, H. Li, and Q. Xie, *Experimental Study on Unidirectional Pedestrian Flows in a Corridor with a Fixed Obstacle and a Temporary Obstacle*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 560, Elsevier, 2020, p. 125188.
- [71] M. Iryo-Asano and W. Alhajyaseen, *Consideration of a Pedestrian Speed Change Model in the Pedestrian-vehicle Safety Assessment of Signalized Crosswalks*, Transportation Research Procedia, vol. 21, Elsevier, 2017, pp. 87-97.
- [72] K. Shaaban and K. Abdel-Warith, *Agent-based Modeling of Pedestrian behavior at an Unmarked Midblock Crossing*, Procedia Computer Science, vol. 109, Elsevier, 2017, pp. 26-33.
- [73] V. Wicramasinghe and S. Dissanayake, *Evaluation of Pedestrians' Sidewalk Behavior in Developing Countries*, Transportation Research Procedia, vol. 25, Elsevier, 2017, pp. 4068-4078.
- [74] A. Corbetta, C. Lee, R. Benzi, A. Muntean, and F. Toschi, *Fluctuations Around Mean Walking Behaviors in Diluted Pedestrian Flows*, Physical Review E, vol. 95, no. 3, APS Physics, 2017, pp. 1-10.
- [75] J. Zhao, J. Malenje, Y. Tang, and Y. Han, *Gap Acceptance Probability Model for Pedestrians at Unsignalized Mid-block Crosswalks based on Logistic Regression*, Accident Analysis & Prevention, vol. 129, Elsevier, 2019, pp. 76-83.
- [76] T. Maurer, T. Gussner, L. Buerkle, and D. Gavrilu, *Method and Device for Classifying a Behavior of a Pedestrian when Crossing a Roadway of a Vehicle as Well as Passenger Protection System of a Vehicle*, US Patent no. US 9,734,390 B2, August 2017.
- [77] P. Kielar and A. Borrmann, *An Artificial Neural Network Framework for Pedestrian Walking Behavior Modeling and Simulation*, Collective Dynamics Journal, vol. 5, Köln, Germany, 2020, pp. 290-298.
- [78] H. Dong, M. Zhou, Q. Wang, X. Yang, and F-Y Wang, *State-of-art Pedestrian and Evacuation Dynamics*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 99, May 2019, pp. 1-18.
- [79] M. Hussein and T. Sayed, *Validation of an Agent-based Microscopic Pedestrian Simulation Model in a Crowded Pedestrian Walking Environment*, Transportation planning and technology, vol. 42, no. 1, Taylor & Francis, 2019, pp. 1-22.
- [80] J. Vacková and M. Bukáček, *Follower-Leader Concept in Microscopic Analysis of Pedestrian Movement in a Crowd*, Collective Dynamics Journal, vol. 5, Köln, Germany, 2020, pp. 496-498.
- [81] L. Cheng, R. Yarlagadda, C. Fookes, and P. Yarlagadda, *A Review of Pedestrian Group Dynamics and Methodologies in Modelling Pedestrian Group Behaviours*, World Journal of Mechanical Engineering, vol. 1, September 2014, pp. 2-13.
- [82] C. Borgiattino, *Vehicular Networks and Outdoor Pedestrian Localization*, Poltecnico di Torino, Italy, May 2015.
- [83] K. Oyeboode, S. Du, B. van Wyk, and K. Djouani, *Image-Based Navigation System for Pedestrians in an Indoor Environment*, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC), vol. 12, no. 2, Malaysia, 2020, pp. 45-51.
- [84] L. Xu, Z. Xiong, J. Liu, Z. Wang, and Y. Ding, *A Novel Pedestrian Dead Reckoning Algorithm for Multi-mode Recognition based on Smartphones*, Remote Sensing, vol. 11, no. 3, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, 2019, pp. 1-19.
- [85] F. Liu, J. Wang, J. Zhang, and H. Han, *An Indoor Localization Method for Pedestrians base on Combined UWB/PDR/Floor Map*, Sensors, vol. 19, no. 11, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, 2019, pp. 1-19.
- [86] Z. Huang, L. Xu, and Y. Lin, *Multi-Stage Pedestrian Positioning Using Filtered WiFi Scanner Data in an Urban Road Environment*, Sensors, vol. 20, no. 11, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, 2020, pp. 1-20.
- [87] S. Lee, B. Cho, B. Koo, S. Ryu, J. Choi, and S. Kim, *Kalman Filter-based Indoor Position Tracking with Self-calibration for RSS variation Mitigation*, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 11, no. 8, March 2015.
- [88] D. Li, Y. Lu, J. Xu, Q. Ma, and Z. Liu, *iPAC: Integrate Pedestrian Dead Reckoning and Computer Vision for Indoor Localization and Tracking*, IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 183514-183523.
- [89] J. Xu, H. Chen, K. Qian, E. Dong, M. Sun, C. Wu, and Z. Yang, *iVR: Integrated Vision and Radio Localization with Zero Human Effort*, in proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, vol. 3, no. 3, 2019, pp. 1-22.
- [90] W. Yaakob and M. Mohamad, *Wireless LAN FM Radio-based Robust Mobile Indoor Positioning. An Initial Outcome*, International Journal of Software Engineering and Its Applications, vol. 8, no. 2, February 2014, pp. 313-324.
- [91] R. Etikyala, *Pedestrian Flow Models*, Technische Universität Kaiserslautern, Germany, 2014.
- [92] B. Kadali and P. Vedagiri, *Evaluation of Pedestrian Accepted Vehicle Gaps with Varied Roadway Width under Mixed Traffic Conditions*, Transportation Letters, vol. 11, no. 9, Francis & Taylor, 2019, pp. 527-534.
- [93] M. Mandar and A. Boulmakoul, *Virtual Pedestrians'Risk Modeling*, International Journal of Civil Engineering and Technology, vol. 5, no. 10, India, October 2014, pp. 32-42.
- [94] K. Hunter-Zaworski and J. Mueller, *Evaluation of Alternative Pedestrian Traffic Control Devices*, Oregon Department of Transportation, March 2012.
- [95] F. Mo, S. Zhao, C. Yu, Z. Xiao, and S. Duan, *Design of a Conceptual Bumper Energy Absorber Coupling Pedestrian Safety and Low-speed Impact Requirements*, Applied bionics and biomechanics, vol. 2018, Hindawi.com, article ID 9293454.
- [96] O. Ito, M. Umezawa, H. Asanuma, and Y. Gunji, *Pedestrian Protection System*, US Patent no. US 2020/0039467 A1, February 2020.
- [97] M. Ptak, *Method to Assess and Enhance Vulnerable Road User Safety during Impact Loading*, Applied Sciences, vol. 9, no. 5, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, 2019, pp. 1-20.
- [98] Y. Li, *An Overview of the DSRC/WAVE Technology*, Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks. Springer, Berlin, Germany, 2012, pp. 544-558.
- [99] F. Arena and G. Pau, *Method to Assess and Enhance Vulnerable Road User Safety during Impact Loading*, Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 9, no. 2, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, 2020, p. 22.
- [100] H. Hamdane, T. Serre, R. Anderson, C. Masson, and J. Yerpez, *Description of Pedestrian Crashes in Accordance with Characteristics of Active Safety Systems*, International Research Council of Biomechanics of Injury, Berlin, Germany, September 2014.
- [101] M. Bagheri, M. Siekinen, and J. Nurminen, *Cellular-based Vehicle-to-Pedestrian (V2P) Adaptive Communication for Collision Avoidance*,

- in proceedings of 3rd International Conference on Connected Vehicles and Expo, Vienna, Austria, November 2014.
- [102] F. Qiao, X. Wang, and L. Yu, *Short-range Wireless Communication System for V2I Communication*, in proceedings of the 26th international Chinese Transportation Professional Association Annual Conference, vol. 2426, Tampa, FL, USA, May 2013.
- [103] S. Diewald, P. Lindemann, and M. Kranz, *Connected Mobility Aids: Supporting Physically Impaired Traffic Participants with Vehicle-to-X Communication*, in proceedings of the 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE 2014), Vienna, Austria, November 2014, pp. 861-862.
- [104] A. Correa, M. Barceló, A. Morell, and J. Lopez, *Indoor Pedestrian Tracking System Exploiting Multiple Receivers on the Body*, in proceedings of the 5th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Busan, Korea, October 2014. pp. 518-525.
- [105] L. Delgrossi and T. Zhang, *Connected Vehicles*, Vehicle Safety Communications. 1st. ed., T. Russell and V. Lau Eds., John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 32-43.
- [106] A. Festag, *Standards for Vehicular Communication-from IEEE 802.11p to 5G*, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, vol. 132, no. 7, Austria, 2015, pp. 409-416.
- A. Vegni, M. Biagi, and R. Cusani, *Smart Vehicles, Technologies and Main Applications in Vehicular Adhoc Networks*, Vehicular Technologies Deployment and Applications. 1st. ed., L. Galati and L. Reggiano Eds. InTech, 2013, pp. 3-20.

Cachicamo: Un Videojuego de Plataformas para la Concienciación en la Preservación del Armadillo Gigante

Edgar Bernal¹, Esmitt Ramírez^{2,3}
edgar.bernal@gmail.com, esmitt.ramirez@ciens.ucv.ve

¹ Departamento de Computación y Tecnología de la Información, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

² Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

³ Centre de Visió per Computador, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España

Resumen: La conservación de animales en peligro de extinción es una problemática que afecta a muchas regiones alrededor del mundo. Un caso particular, es el armadillo gigante (*Priodontes maximus*) que es un animal que habita en América del Sur, ocupando una parte de la región de los llanos de Colombia y Venezuela. Como parte de los mecanismos de protección de este animal, existe un marco legal para la conservación de las especies amenazadas, sin embargo, esto no es suficiente para protegerlas, es necesario incrementar las estrategias de educación ambiental en la conservación de especies. Generalmente, se planifican espacios para discusiones y charlas, sin embargo, existen otras estrategias de igual impacto enfocadas en nuevas generaciones de jugadores. En este trabajo se plantea el desarrollo de un videojuego capaz de entretener y de concienciar al público simultáneamente, como un método alternativo de educación ambiental que pueda trascender y sensibilizar a las personas, haciendo uso de la tecnología. Cachicamo es un videojuego perteneciente al género de acción que utiliza plataformas con *puzzles* proyectado en 2.5D, para el fomento de la conservación del armadillo. El jugador es un armadillo que recorre un número finito de ambientes hasta llegar a una meta final, atravesando obstáculos y enemigos, mediante la resolución de diversos acertijos (*puzzles*) que van aumentando de dificultad a medida que avanza por los ambientes. El videojuego pretende concienciar a una parte de la población (infantil-juvenil), y por ello se construyeron métricas para medir su impacto, considerando la opinión de las personas de acuerdo con las encuestas realizadas. Así, nosotros consideramos que Cachicamo es un producto final de alta calidad gráfica y un pulido diseño de nivel, que ayuda a la concienciación en la conservación del armadillo.

Palabras Clave: Videojuego; Juego de Plataforma; Proyección 2.5D; Diseño de Niveles; Armadillo.

Abstract: The conservation of endangered animals is a problem that affects many regions around the world. A particular case represents a giant armadillo (*Priodontes maximus*) which is an animal that lives in South America, occupying a part of *Los Llanos* of Colombia and Venezuela. As part of the protection mechanisms of this animal, there are education and awareness initiatives. Moreover, a legal framework for the conservation of threatened species is not enough to protect them, and it is necessary to increase environmental education strategies in species conservation. Principally, spaces for discussions and talks are planned, however, there are other strategies of similar impact focused on new generations of players. This paper proposes the development of a videogame capable of both entertaining and raising public awareness, as an alternative method of environmental education that can transcend and sensitize people adopting the technology. Cachicamo is a videogame which belongs to the genre of action utilizing platforms with puzzles with 2.5D projection, in the promotion of the conservation of the armadillo. The player is an armadillo that travels a finite number of environments until achieving a final goal, crossing obstacles and enemies, by solving various riddles (puzzles) that increase in difficulty as player progresses through the environments. The videogame purposes to raise awareness of a part of the population (child-youth), and therefore metrics were built to measure their impact, considering the opinion of the people according to the surveys carried out. Thus, we consider Cachicamo is a product of high graphic quality that helps to raise awareness in the conservation of the armadillo.

Keywords: Videogame; Platform Game; 2.5D Projection; Level Design; Armadillo.

I. INTRODUCCIÓN

La biodiversidad es un término que hace referencia a la cantidad y variedad de especies que habitan un área determinada, la cual se rige por dos procesos fundamentales: la extinción de las especies existentes y la aparición de nuevas especies [1], [2], [3]. La biodiversidad de cada región constituye un recurso valioso para la ecología, para la preservación del medio ambiente y para la conservación de la vida sobre la Tierra. La supervivencia del ser humano depende en gran parte de la conservación de la biodiversidad, en tanto que la explotación de los recursos naturales es la base de las actividades que dan sustento a la humanidad. Sin embargo, es el ser humano quien genera el mayor impacto en la alteración de los ecosistemas, amenazando la conservación de la biodiversidad [1], [4].

La sobreexplotación, el aprovechamiento irracional y la utilización descontrolada de los recursos naturales, mantiene amenazada a una proporción significativa de especies. Es responsabilidad de la humanidad evitar que el deterioro de la biodiversidad se haga más grave, por esta razón la conservación de las especies se ha vuelto un objetivo común de diferentes naciones y culturas del mundo a través de una gran cantidad de organismos e iniciativas.

En Venezuela existen varias especies amenazadas como el Armadillo Gigante (*Priodontes maximus*), una de las cuatro especies de cachicamos existentes en ese país. El armadillo es un animal nocturno e insectívoro, cuya característica principal es su llamativo caparazón dorsal de varias bandas. En el mundo existe una variedad de especies de armadillo [5], [6], muchas de ellas se encuentran distribuidas en diferentes regiones en toda América, y algunas se encuentran en peligro de extinción [7]. De por sí, el armadillo es un animal biológicamente débil dados sus hábitos alimenticios y reproductivos. Su principal depredador es el hombre, con su caza indiscriminada, para utilizar su coraza como adorno y su carne como alimento exótico, así como traficar especímenes vivos de forma ilegal.

El peligro de las especies no se reduce únicamente a la caza, también la contaminación de su hábitat es causal de su vulnerabilidad. Una población consciente de esta realidad puede contribuir de forma activa en la prevención de situaciones de peligro, a través de acciones concretas como la preservación del hábitat y el ambiente, evitando dar muerte a estas especies, alertando de situaciones de tráfico ilegal, etc. Sin embargo, el peligro de extinción del armadillo gigante (*Priodontes maximus*) y de otras especies, es una realidad poco conocida por la población.

En cuanto a su población no se conocen estudios de ningún fragmento de su distribución. En Venezuela su distribución geográfica es amplia pero se encuentra localmente restringida con densidades poblacionales muy bajas. Probablemente habitaba zonas de sabana donde en la actualidad ha sufrido extinciones locales debido a las altas tasas de explotación

y a la destrucción de hábitat. Al norte del río Orinoco las poblaciones están virtualmente extintas, particularmente en la cordillera de la Costa. A escala internacional la IUCN clasifica a la especie como Vulnerable. En Colombia se le reporta En Peligro, y en Perú y Ecuador como Vulnerable [15].

Según [15] el armadillo gigante (*Priodontes maximus*) que habita en Venezuela es un animal protegido desde los años 70, y desde entonces, se han llevado a cabo diferentes iniciativas de educación y concienciación. Existe un marco legal con respecto a la conservación de especies amenazadas y existen diferentes iniciativas, tanto gubernamentales como de organizaciones para la promoción de la conciencia social de esta problemática [7], [8], [9].

Para evitar la extinción de la especie del armadillo es necesario crear estrategias que no sólo permitan la divulgación del conocimiento, sino que sensibilicen y creen conciencia social entorno a esta problemática. Algunas de las estrategias pueden plasmarse a través de una herramienta innovadora, que pueda trascender a personas de todas las edades, haciendo uso de las nuevas tecnologías, de manera creativa y agradable. Un ejemplo destacable son los videojuegos, los cuales sirven como mecanismos de estrategia que pueden ayudar a la concienciación desde un punto de vista lúdico, en donde el jugador puede percibir un mensaje a través de una meta-narrativa mientras se divierte. En este sentido la ludificación es una buena alternativa para la educación ambiental en tanto que el contenido a transmitir no resulta evidente y el medio no será tedioso para quien interactúa con el videojuego [10], [11], [12].

En Venezuela, se han realizado investigaciones basadas en videojuegos empleando la ludificación. Un caso a destacar es el videojuego Einalu'u [13] que propone un videojuego de simulación de construcción y gestión de culturas indígenas prehispánicas. Particularmente, en el caso de la preservación de animales en peligros de extinción, Lima et al. [14] presentaron el videojuego Aventura Venezuela cuyo objetivo es concientizar sobre la preservación de la fauna silvestre venezolana: oso frontino, tuqueque de Monte Carlo, rocuál del norte, entre otros.

Ahora, los videojuegos se pueden clasificar a groso modo según su género tomando en cuenta su jugabilidad más que sus diferencias visuales o narrativas. A lo largo de la historia de los videojuegos han ido surgiendo nuevos géneros por la necesidad de clasificar juegos que no podían ser agrupados junto a otros existentes. La gran variedad de juegos en la actualidad y su complejidad ha difuminado los límites entre unos géneros y otros. Por ello actualmente es habitual que un juego se llegue a englobar en más de un género dependiendo en ocasiones del objetivo que tenga el jugador. Los géneros más representativos son: acción, aventura, rol, deportes, educativo, combate y simulación.

Los videojuegos de plataformas son del género de acción y

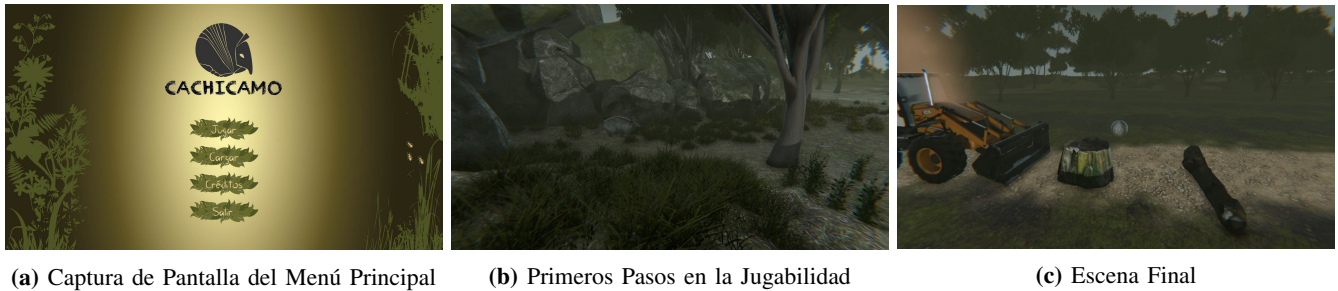


Figura 1: Capturas de Pantalla de la Ejecución de Cachicamo

sus mecánicas son ampliamente conocidas como un estándar dentro de los juegos de este tipo, que resultan altamente atractivos y permiten al jugador conectarse rápidamente con la dinámica del juego. La interacción esencial de este tipo de género se logra a través de plataformas que pueden estar a diferentes alturas. Las mecánicas más conocidas de los personajes dentro de este género son el desplazamiento y salto sobre una serie de plataformas u obstáculos.

En este artículo se propone un videojuego de plataformas para promover la conservación del cachicamo. El videojuego, llamado Cachicamo, es del género de acción y sus mecánicas son ampliamente conocidas como un estándar dentro de los juegos de este tipo, que resultan interesantes y permiten al jugador conectarse rápidamente con la dinámica del juego. Cachicamo emplea una proyección 2.5D, es decir sobre un plano definido, donde son aplicados efectos como sistemas de partículas, *shaders*, luz volumétrica y otros efectos que generan mayor realismo y acabado gráfico al juego. En la Figura 1 se muestran unas escenas del videojuego.

La organización de este artículo se presenta a continuación. En la Sección II se describen aspectos del diseño lúdico usados como la dinámica, mecánica del juego, así como las características de los niveles. La Sección III describe la propuesta planteada tomando en consideración áreas de conocimiento en el desarrollo del videojuego: la inteligencia artificial de los enemigos, simulaciones físicas y aspectos de arte son explicados en detalle en esta sección. La Sección IV contiene la experimentación realizada para demostrar nuestra propuesta. Finalmente, la Sección V, muestra las ideas finales de la investigación realizada, analizando el proceso de desarrollo.

II. DISEÑO LÚDICO

La ejecución de una actividad de manera voluntaria donde se obtiene un resultado agradable genera una experiencia lúdica. Esta se logra basándose en la definición y aceptación de un conjunto de reglas, y la aceptación de un entorno paralelo en ejecución. La concepción de estos dos aspectos puede entenderse como el diseño lúdico. De acuerdo con la estética y las características de la forma del juego (i.e. jugabilidad) definido por un diseño lúdico, los videojuegos pueden agruparse en diversos géneros.

Los videojuegos del género de plataformas son un género cuya dinámica se centra en la interacción del personaje controlado por el jugador, siendo capaz de manejar ciertas habilidades de movimiento como caminar, correr, saltar o escalar sobre una serie de plataformas. En su entorno, se le presentan obstáculos y enemigos que el jugador debe evitar hasta llegar a la meta final. Este género se originó con Space Panic [16] y Donkey Kong [17] a inicios de los años 80 y tuvo su cenit con Super Mario Bros [18] en el año 1985. El uso de la gravedad y el empleo de escaleras o saltos para moverse a través de las plataformas que flotan a lo largo de la pantalla es la diferencia de estos juegos con respecto a otros juegos populares de su época.

Los primeros juegos de plataformas se caracterizaban por mostrar una jugabilidad donde el jugador se desplaza generalmente de izquierda a derecha hasta alcanzar un objetivo. En estos juegos la proyección suele ser ortogonal, con una cámara estática a una cierta distancia y ángulo fijo, que se mueve en una o dos direcciones para seguir al jugador y ampliar el campo (espacio) donde se desarrolla el juego. A este tipo de género se le conoce como desplazamiento lateral (i.e. *sidescrolling*) [19], en la Figura 2 se muestra un ejemplo que representa a un juego en esta categoría.

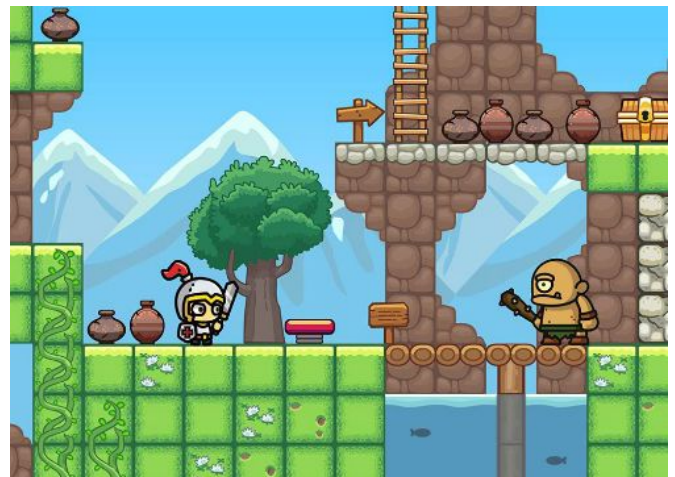


Figura 2: Desplazamiento Lateral en un Juego 2D

Según Hearn y Baker [20], existen tres tipos de dimensiones en la construcción de escenas previo al despliegue gráfico



Figura 3: Tipos de Enemigos del Cachicamo

empleadas en los videojuegos de plataformas:

- **Bidimensionales (2D):** los objetos de una escena están compuestos de primitivas de dos dimensiones o sprites.
- **Tridimensionales (3D):** los objetos tienen movilidad libre sobre las escenas, y suelen representarse por mallas poligonales y mediante una proyección de transformación y efectos visuales, se da una sensación real de profundidad.
- **Dimensión 2.5D:** similar a los tridimensionales con la diferencia que los objetos se desplazan siempre sobre un plano definido (e.g. plano XY , horizontal y vertical) lo cual facilita el cómputo para el despliegue y operaciones de interacción entre objetos.

Cachicamo se puede clasificar dentro del género de juegos de plataformas de desplazamiento lateral con *puzzles* con dimensión 2.5D, donde la mecánica principal de desplazamiento del jugador es rodar como una esfera. El personaje principal es un cachicamo que intenta sobrevivir y escapar de las amenazas que se le presentan. La experiencia esencial se basa en sentir una constante ansiedad ante una amenaza latente permitiendo identificarse con el cachicamo como víctima, lo cual da énfasis a la intención de concientizar y sensibilizar a través del juego. Se desea que el juego constituya un aporte en la promoción de la conservación de esta especie vulnerable.

El desarrollo de videojuegos contempla al menos tres grandes áreas fundamentales, la programación, el arte y el diseño lúdico. Se consideraron como referencias artísticas y de diseño los videojuegos Limbo [21], Never Alone [22] y Ori and the Blind Forest [23]. Estos videojuegos utilizan las mecánicas estándar de los juegos de plataformas y una estrategia narrativa donde la historia se va contando a medida que el jugador interactúa con su entorno y va avanzando dentro del juego. En estos referentes los enemigos suelen abordar al jugador por sorpresa al protagonista, y esta técnica es la empleada en Cachicamo donde algunos enemigos presentan este tipo de comportamiento.

La dinámica del juego se caracteriza por la acción y movilidad que han de estar presentes en el jugador en todo momento. Constantemente el jugador es retado por las adversidades de su entorno, la presencia de enemigos y los acertijos que deberá superar para poder avanzar dentro de cada uno de los niveles. Todo ello, mientras enfrenta toda

serie de obstáculos que ascienden en complejidad, haciendo que el jugador se introduzca en una meta-narrativa que plantea un mensaje de conservación del cachicamo como especie amenazada.

Aunque no haya una historia explícita, el cachicamo seguirá una especie de secuencia predefinida de ambientes, obstáculos y enemigos. El objetivo es recorrer los niveles en un orden que permita descubrir las habilidades y los retos que enfrenta el cachicamo para su sobrevivencia y la de los suyos, a medida que descubre el mapa de juego.

Para superar los obstáculos, el jugador va aprendiendo una serie de mecánicas a medida que avanza el juego. En la Figura 4 se muestra la máquina de estados del personaje principal acorde a las mecánicas, que se pueden resumir en:

- **Caminar:** el personaje podrá moverse con sus cuatro extremidades.
- **Hacerse bola:** para activar esta mecánica es necesario estar en la mecánica Caminar.
- **Saltar:** en tierra firme, sólo es permitido saltar cuando el personaje está en forma de bola. Al ser activado el personaje saltará a una distancia que puede variar de la intensidad del salto.
- **Salto de pared:** para llegar a lo más alto a veces es necesario saltar apoyándose de paredes u objetos afines.
- **Trepar:** se puede trepar y escalar sobre cuerdas, es posible balancearse de un lado a otro. Además, posee la habilidad de saltar.
- **Nadar:** al sumergirse en el agua, el personaje estará habilitado para nadar. Podrá permanecer dentro del agua por un tiempo definido (6 min de acuerdo con la capacidad real que tiene un cachicamo para contener la respiración).
- **Ataque:** existe la posibilidad de adormecer ciertos enemigos mediante esta mecánica cuando el jugador se encuentra en forma de bola. El jugador cae con fuerza sobre el enemigo al saltar para aturdirlos con su caparazón.
- **Dar garrazos:** utilizado para hacer daño a ciertos objetos, sólo se activa si el personaje no está en forma de bola.

Nótese que estas mecánicas son decisiones de diseño basados en el estudio de las características del comportamiento del cachicamo. Si bien es un juego donde las características de

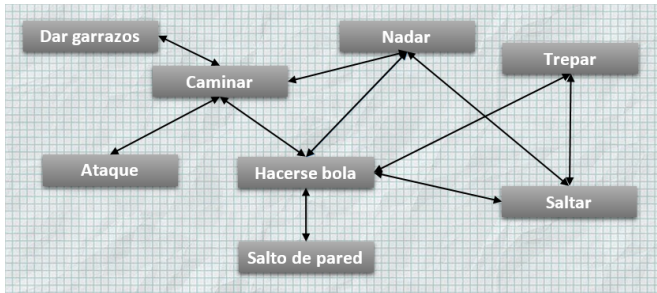


Figura 4: Máquina de Estados de Personaje Principal

sus personajes y entorno pueden ser libres, en Cachicamo estamos empleando aspectos reales tal que su impacto sea a su vez educativo para lograr la concienciación requerida como objetivo primordial de nuestro enfoque. Para más información sobre el comportamiento, estilo de vida, hábitat, entre otros de los cachicamos se puede consultar los textos [5], [6], [7], [15].

A. Niveles

El juego presenta tres tipos de entornos distintos y estéticamente bien diferenciados, que se presentan al jugador como niveles progresivos que permiten introducir nuevas mecánicas, enemigos, obstáculos y *puzzles*, justificados por una meta-narrativa y una curva creciente de complejidad.

El cachicamo comenzará su recorrido en el nivel de los llanos, luego avanzará a un nivel rural, que lo hará continuar en otro nivel de los llanos, finalmente su aventura terminará en el nivel de la selva. Así, el cachicamo podrá saltar de plataforma en plataforma, nadar por regiones con agua, esconderse en madrigueras, rescatar a otros cachicamos cautivos, evitar amenazas de captura, sobrevivir a los depredadores y resolver acertijos para continuar su aventura. A medida que el jugador avanza por los niveles, se habilitarán nuevas habilidades y el nivel de dificultad se incrementará.

A modo de transición entre niveles, el juego muestra unos breves *Cut Scenes*, que se definen como segmentos informativos que interrumpen temporalmente la jugabilidad para comunicar un mensaje al jugador (ver Figura 5). La temática alrededor de la cual giran los *Cut Scenes*, serán aspectos referentes al cachicamo como especie. La intención es comunicar al jugador la importancia de la preservación de las especies amenazadas, promoviendo así la conservación a través de la sensibilización de los jugadores.

B. Enemigos

Los primeros enemigos son animales con los cuales el cachicamo comparte hábitat, no son depredadores naturales pero pueden disputarse el territorio, por esto su comportamiento es de patrullaje dentro de un área y sólo perseguirán al cachicamo si entra dentro de esa área, como se ilustra en la Figura 3.

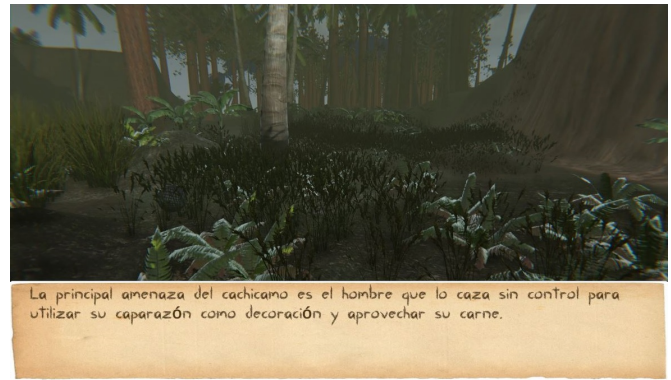


Figura 5: Un Ejemplo de una Transición *Cut Scene*

Cuando el cachicamo entra en entornos rurales, se enfrenta a la amenaza de fragmentación del hábitat al tener que entrar a zonas de riesgo, y enfrentarse a otro tipo de enemigo que protege estos territorios con un comportamiento no sólo de patrullaje sino también de persecución. Los perros de caza y perros domésticos (ver Figura 3b) pertenecen a este grupo de enemigos, en tanto que ahuyentan a los cachicamos de las zonas rurales.

Finalmente, el cachicamo puede enfrentarse a depredadores naturales como enemigos, que manifiestan un comportamiento de ataques sorpresivos, persecución y emboscada. Los depredadores terrestres naturales del cachicamo son felinos, báquiros, zorros, coyotes, entre otros. Estos se encuentran al acecho, como el báquiro de la Figura 3a, que persiguen al cachicamo hasta que este logra escapar de su alcance o algún obstáculo le impide seguirlo. El cachicamo también encontrará enemigos en otros entornos, como el cocodrilo que se muestra en la Figura 3c el cual representa a un depredador no sólo en entornos terrestres sino también acuáticos. Particularmente, este enemigo se mantiene estático en un lugar y si el cachicamo se acerca a su territorio lo atacará.

Los cocodrilos pueden atacar en solitario o en manadas. En los entornos de agua, el jugador podrá encontrar también cardúmenes de pirañas, que tienen el mismo comportamiento de los cocodrilos con la diferencia que siempre atacan en manada y sólo se encuentran dentro del agua. En los entornos terrestres, el jugador podrá atacar a algunos enemigos saltándoles encima en forma de bola para noquearlos temporalmente con su duro caparazón.

III. NUESTRA PROPUESTA

Como se mencionó anteriormente, Cachicamo es un videojuego que emplea plataformas con *puzzles* en una proyección 2.5D desarrollado en Unity para la plataforma *Windows*. Para ello, se empleó un proceso incremental de desarrollo siempre considerando el aspecto visual, la interacción del usuario, y el apego al ambiente real como principales objetivos de nuestra propuesta. En la Figura 6 se muestra un instante del proceso

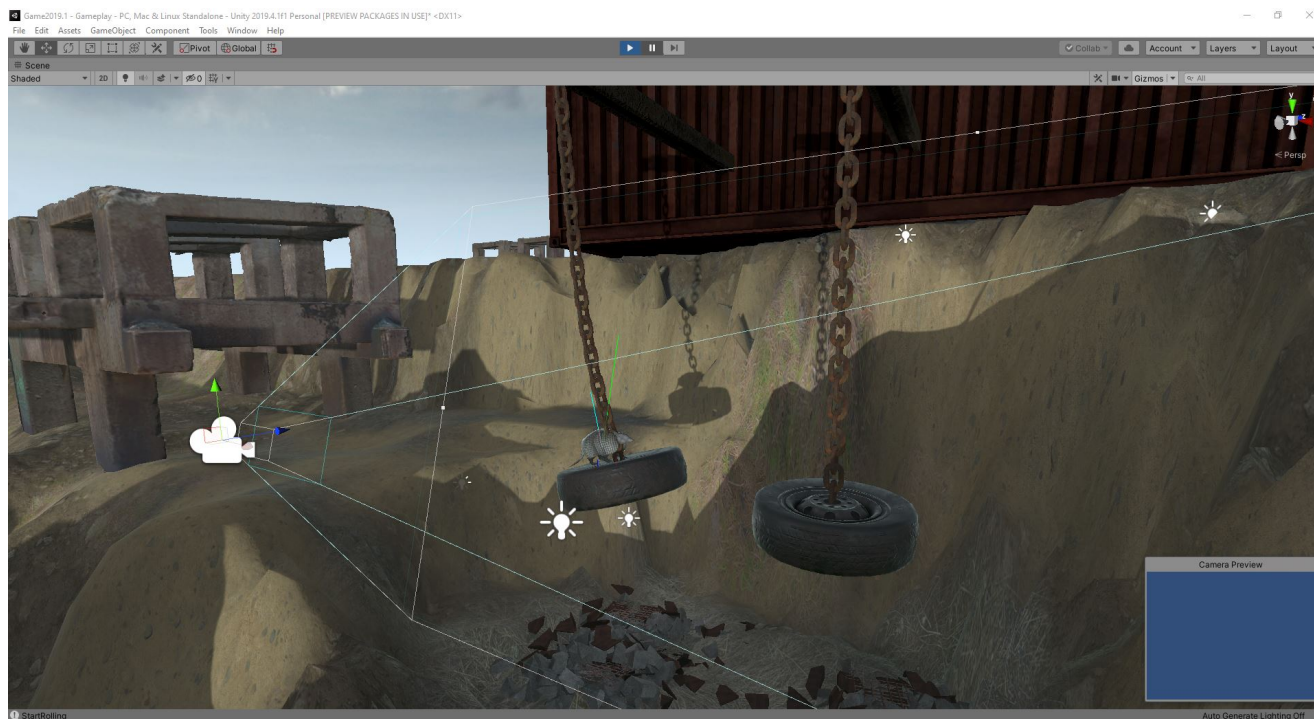


Figura 6: Proyección de la Escena durante el Proceso de Diseño de Cachicamo

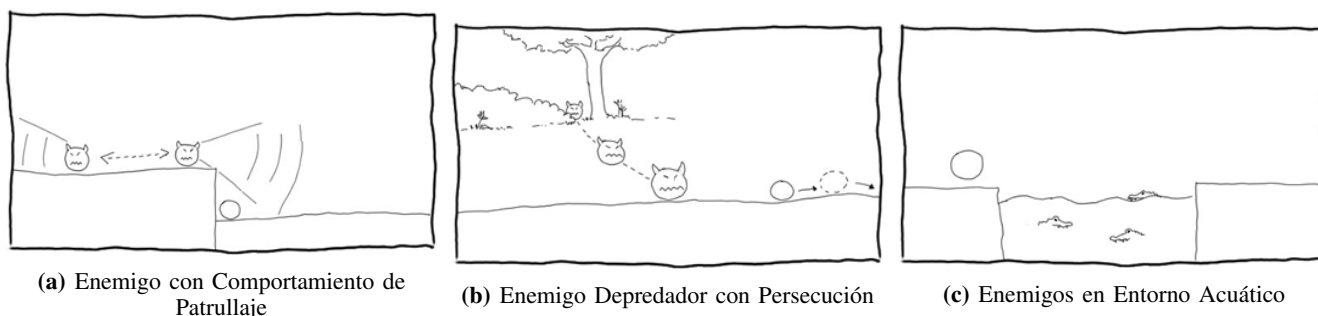


Figura 7: Bosquejo del Diseño de los Enemigos de Cachicamo

de desarrollo en Unity donde se pueden observar parte de los elementos visuales presentes para su creación.

La población de jugadores que va dirigido el videojuego es principalmente personas categorizadas como infantiles-juveniles en un rango de edades entre 8-30 años aproximadamente.

En la programación de Cachicamo intervienen diferentes áreas de conocimiento como la computación gráfica, el álgebra vectorial, el manejo de estructuras y algoritmos de despliegue, entre otros aspectos. Actualmente existen una gran variedad de motores para el desarrollo de videojuegos, que ofrecen todo un *framework* con estos componentes fundamentales para simplificar el proceso de desarrollo, para enfocarse en desarrollar la interactividad, las mecánicas y otros aspectos de la lógica de juego. En la actualidad, entre los más utilizados se encuentran Unity 3D [24], Unreal [25], CryEngine [26], entre otros. Para el desarrollo de Cachicamo,

se optó por Unity 3D.

En términos generales, además de estos componentes un videojuego puede requerir la implementación de algoritmos de Inteligencia Artificial, simulación de físicas, patrones de diseño, redes de computadoras, tanto para la conectividad en el caso de los juegos en línea o multijugador, así como para garantizar la seguridad en las plataformas de pago. A continuación, se presentará los enfoques empleados en nuestra propuesta.

A. Inteligencia Artificial

En los videojuegos, la Inteligencia Artificial (IA) se puede aplicar en la simulación de los comportamientos de los personajes que no son controlados por el jugador. Normalmente se conoce a estas entidades como PNJ (Personaje No-Jugador). Igualmente, la IA se emplea para crear recorridos o navegación de escenas, para la toma de decisiones en

juegos, para simular tácticas y estrategias militar, sistemas de aprendizaje, simulación del comportamiento inteligente de un rival en juegos de tablero, etc [27].

En los videojuegos de plataformas, la IA se puede aplicar para el control de los PNJ que puedan aparecer en la escena, pudiendo ser enemigos, aliados o personajes neutrales. Lo primero que se hace es definir los movimientos básicos para controlar el desplazamiento de las entidades PNJ dentro de una escena. Dependiendo del comportamiento a simular, el algoritmo puede requerir de uno o más parámetros para crear el movimiento del PNJ. Millington [27] define algunos de estos movimientos como:

- **Seek:** el PNJ persigue a un elemento objetivo que puede ser móvil o no.
- **Flee:** el PNJ se aleja de un elemento objetivo que puede ser móvil o no.
- **Arrive:** la velocidad de movimiento del PNJ disminuye conforme se acerca o se aleja de un elemento objetivo.
- **LookWhereYoureGoing:** orientar el movimiento a la dirección a donde está mirando el PNJ.
- **Wander:** el PNJ se desplaza en direcciones pseudo-aleatorias dentro de una escena.
- **Path Finding:** el PNJ se desplaza dentro de una escena siguiendo una ruta predefinida.

A partir de estos movimientos básicos, es posible combinarlos entre ellos (y añadiendo otros enfoques) para construir comportamientos más complejos:

- **Obstacle Avoidance:** el PNJ persigue un elemento objetivo evitando obstáculos. Este comportamiento utiliza un algoritmo seek más complejo donde el elemento objetivo cambia dinámicamente.
- **Patrullaje:** el PNJ hace un recorrido de manera cíclica dentro de un área limitada. Este algoritmo puede utilizar una búsqueda automática del camino que se reutiliza, haciendo el recorrido inverso al cambiar el elemento objetivo al punto de partida. En la Figura 7a se observa un bosquejo básico del comportamiento de patrullaje para Cachicamo.
- **Perseguir:** se agrega un componente de predicción al algoritmo seek de forma tal que el PNJ no persiga al elemento objetivo, sino a la dirección donde el elemento objetivo se está desplazando (ver Figura 7b).
- **Flock:** varios PNJ se desplazan como una bandada o un cardumen, de forma tal que todos parecen seguir a un elemento objetivo, manteniéndose equidistantes unos de otros mientras hacen el recorrido. La Figura 7c representa este comportamiento para enemigos en el agua.

Cachicamo implementa los comportamientos antes mencionados empleando IA en los enemigos. Estos pueden tener varios comportamientos de acuerdo con su interacción con el jugador. Por otro lado, se creó una máquina de estados para garantizar la completitud en las transiciones entre los

comportamientos.

B. Simulación Física

En base a los componentes integrados en Unity para la simulación física, se desarrollaron nuevos sistemas compuestos para simular el funcionamiento de cuerdas y el agua.

La simulación de cuerdas se logra creando una cantidad de segmentos (*joints*) que son conectados en secuencia hasta formar una cadena. Cada segmento se define por un eje de rotación y una posición para su interconexión entre éstas. Esto proporciona a cada *joint* un grado de libertad en su movimiento.

En la Figura 8 se presenta una captura de pantalla en la edición del sistema de cuerdas desarrollado. Nótese que, en la vida salvaje los cachicamos no usan cuerdas, sin embargo, este comportamiento fue añadido en el diseño con una mayor interactividad al superar obstáculos.

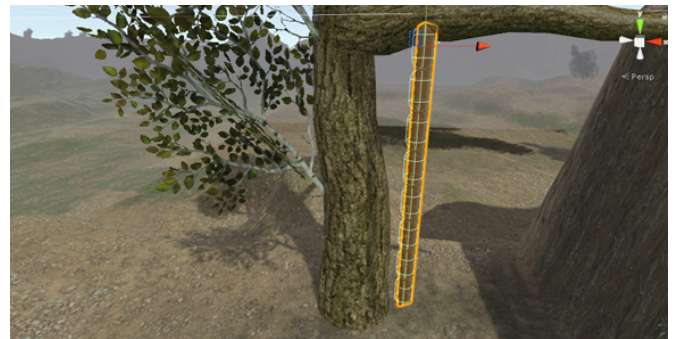


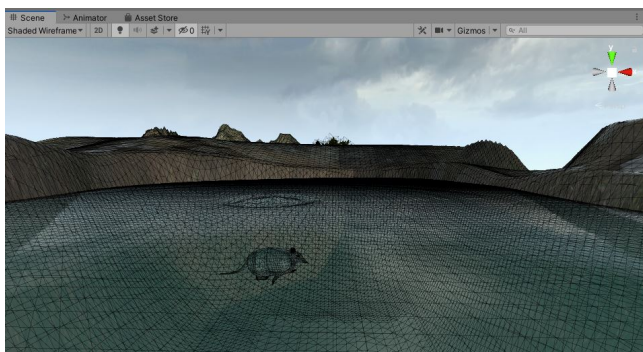
Figura 8: Captura de Pantalla de Edición de las Cuerdas

Por otro lado, se desarrolló un sistema de agua interactivo para simular aguas poco profundas, como piscinas, pequeñas cascadas, estanques, fuentes. El aspecto realista del agua se logra mediante la simulación de olas aplicadas a una malla poligonal de densidad configurable. También incluye un sistema de flotabilidad para objetos que pueden mantenerse sobre la superficie de agua, y para objetos hundidos parcial o totalmente. En la Figura 9a se muestra la representación de la superficie 9b.

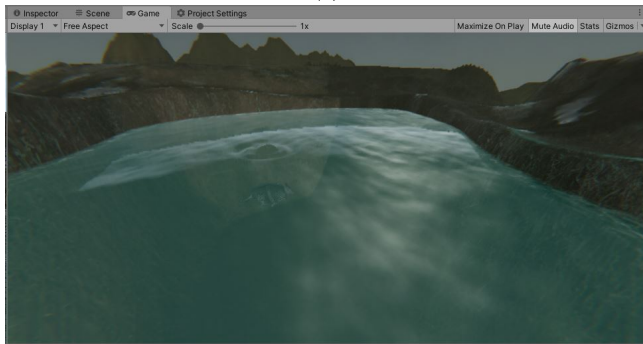
Otro aspecto que incluyen simulaciones físicas es la creación de un objeto sometido a los efectos de estar sumergido dentro de una corriente de agua. Para la simulación de este componente, se aplica una fuerza de desplazamiento de un volumen constante de agua considerando objetos rígidos en una dirección.

C. Sistema de Cámara Dinámica

La cámara dentro del juego tiene como función perseguir y observar en todo momento la posición del jugador. Para este movimiento, se aplica un sistema mass-spring-damper para el suavizado de su trayectoria, la cual se encuentra



(a)



(b)

Figura 9: Superficie del Agua con (a) su Representación en Malla y (b) el *Render Final*

implementado en Unity. La trayectoria puede tener cambios bruscos de la interacción del cachicamo con la escena y la cámara, es por ello el uso del suavizado.

Para mejorar la visibilidad de objetos se mantiene una distancia entre el jugador y la cámara, así como una velocidad de desplazamiento. Debido a la gran diversidad de objetos dentro de la escena estos parámetros podían variar sus valores mejorando la jugabilidad al anticipar y reconocer la cercanía con los objetos.

D. Shaders

Los shaders son programas que son ejecutados directamente en la tarjeta gráfica. Así, es posible crear programas computacionales de cómputo excesivo para estructuras en 2D/3D dentro del ámbito de despliegue (i.e. *rendering*) de escenas. Es posible clasificar los shaders por su aplicación de acuerdo con espacio 3D, espacio imagen, híbrido, donde el primero se aplican a la geometría de la escena, y el segundo a la imagen a desplegar, y el último como una combinación de ambos.

En Cachicamo se emplean shaders a nivel de imagen, que se describen a continuación:

- **Screen Space Reflection:** una técnica para reutilizar los datos de espacio de pantalla para calcular reflexiones. Se

usa comúnmente para crear reflejos más sutiles, como en superficies de suelo mojado o en charcos.

- **Fog:** es el efecto de superponer un color en objetos que dependen de la distancia de la cámara. Se emplea para simular neblina en entornos al aire libre.
- **Ambient Occlusion:** es un método para aproximar la luz brillante de cualquier superficie en función de la luz y su entorno.
- **Bloom:** este efecto produce franjas de luz que se extienden desde los bordes de las áreas brillantes en una imagen contribuyendo a la ilusión de una luz extremadamente brillante que sobrepasa la cámara o el ojo que captura la escena.
- **Color grading:** es el proceso de alterar o corregir el color y la luminancia de la imagen final.

Un ejemplo de la aplicación de un efecto de shader se puede observar en la Figura 10. La Figura 10a muestra una captura de pantalla de un instante del juego sin aplicación del efecto neblina, y en la Figura 10b una vez aplicado. Nótese el efecto visual que genera en toda la escena, añadiendo un elemento de realismo ambientado acorde los objetivos del videojuego.



(a)



(b)

Figura 10: Ejemplo de la Aplicación del Efecto *Fog*: (a) sin su Aplicación y (b) una vez Aplicado

Del mismo modo, para dar un mejor acabado a la iluminación en cuanto a la neblina se implementó un sistema de iluminación volumétrico de código abierto llamado Aura¹, la cual simula la dispersión de la luz en el medio ambiente y la iluminación de micro-partículas que están presentes en el entorno.

¹Disponible en el Asset Store de Unity <https://assetstore.unity.com/packages/tools/particles-effects/aura-volumetric-lighting-111664>

Para el *shader* de objetos 3D se utilizó Unity Surface Shader que tiene incorporado un conjunto de características que permiten simular materiales de objetos del mundo real. Este *shader* es utilizado para imitar la interacción de la luz con objetos, y admite una amplia gama de tipos y combinaciones de sombreadores. Sus características se habilitan o deshabilitan simplemente usando o no los diferentes espacios y parámetros de textura en el editor de materiales.

E. Personajes

Todos los personajes fueron representados mediante modelos en 3D a través de uso de software de edición. El cachicamo fue modelado, aparejado y animado usando Maya [29]. Se crearon animaciones para dar soporte a las mecánicas descritas en la Sección II. En cuanto al texturizado del cachicamo se usó el software Krita [30].

Los depredadores que inicialmente serían los enemigos del cachicamo en este juego son jaguares, perros (bajo dos roles, como perro doméstico y perro de caza), serpientes, osos, cocodrilos o pirañas.

En cuanto a los animales se usó un paquete de *assets* de animales modelados, aparejados, texturizados y animados. En la Figura 12 se pueden observar los animales disponibles en el paquete, entre ellos los cocodrilos y pirañas para los entornos de agua. Se descartó el oso como potencial depredador, puesto que el oso es de ambiente de montaña, aun cuando los cachicamos también comparten este hábitat, no se contempló dentro del diseño de niveles este entorno.

El paquete contiene además algunos animales de granja que fueron utilizados como PNJ de relleno para el nivel rural, el cachicamo no tiene ningún tipo de interacción con ellos.

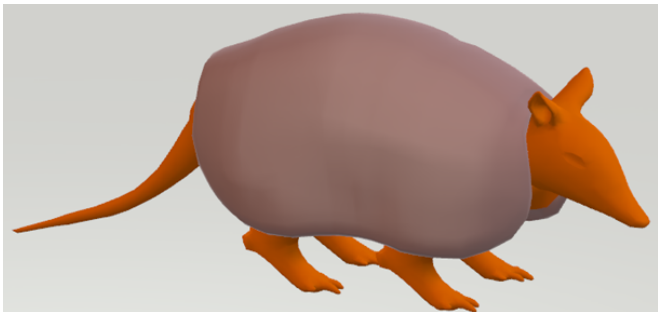


Figura 11: Modelo 3D del Cachicamo

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Durante el desarrollo de Cachicamo se crearon diferentes prototipos digitales agregando de forma iterativa nuevos segmentos del diseño de nivel. En las primeras iteraciones los prototipos fueron creados con geometría básica y sin arte final, haciendo énfasis en las mecánicas, siendo el principal objetivo tratar de comunicar la dinámica y la experiencia esencial del juego. A medida que se generaba un prototipo



Figura 12: Paquete de *Assets* de Animales Empleados

incrementado, ya sea por el desarrollo de un componente o por la inclusión de un nuevo segmento a la escena, se procedía a realizar una jornada de juego a usuarios denominada como *playtesting*, donde se prueba no sólo el incremento agregado sino la última versión del juego en su totalidad.

Realizar las jornadas de *playtesting* permitió detectar errores que no se habían encontrado durante las pruebas habituales de desarrollo. También fue posible validar y mejorar el diseño de niveles en cada incremento, de manera tal que la curva de dificultad estuviera equilibrada y la curva de interés resultara acorde a la dinámica del juego.

Siguiendo la propuesta de Jesse Schell [28] se realizaron jornadas de *playtesting*. Las pruebas que se realizan durante la etapa de desarrollo no son válidas para este fin, puesto que el desarrollador conoce a priori el diseño de nivel, el lugar donde aparecen los enemigos y los obstáculos, los tiempos y la velocidad como ocurren los eventos y la estrategia adecuada para sortear dichos obstáculos, entre otras cosas. Por esta razón es fundamental que en las jornadas de *playtesting* participen personas ajenas al desarrollo del juego, y de preferencia que entren dentro del perfil de jugador definido como público objetivo.

En la Tabla I se observan una compilación de los resultados relevantes obtenidos de las jornadas de *playtesting* realizadas sobre los prototipos, así como las acciones tomadas a partir de estos resultados. En la primera y tercera jornada de *playtesting* participaron tres personas, en la segunda jornada participaron cuatro personas y en la cuarta jornada participaron dos personas.

En la primera jornada los jugadores solían tardar alrededor de 20 minutos, este prototipo sólo abarcaba los dos primeros niveles. En la segunda jornada los jugadores tardaban alrededor de 30 minutos, pudiendo probar hasta el tercer nivel. La duración de la tercera jornada era aproximadamente 45 minutos por jugador, llegando hasta el cuarto nivel. Por

Tabla I: Resumen de Resultados Obtenidos de las Jornadas de *Playtesting*

Resultados	Mejoras o modificaciones
Algunos obstáculos presentaban mucha complejidad	Modificaciones de diseño de nivel
La velocidad de desplazamiento del cachicamo en forma de bola se percibe lenta	Modificación de la física del cachicamo
Bugs con el sistema de agua y el salto	Correcciones en la detección de colisión con la superficie de agua
Algunos enemigos no representan una amenaza real	Ajustes de complejidad de enemigos (velocidad de persecución)
Algunos obstáculos presentaban mucha complejidad	Agregar checkpoints en ciertas zonas para disminuir la dificultad.
	Modificaciones de diseño de nivel
La caída libre del cachicamo luego de un salto se percibe lenta	Ajustes de gravedad
Bugs en el sistema de cuerdas	Mejora en el sistema de cuerdas
Desequilibrios en la curva de complejidad	Modificación de checkpoints
Bugs de enemigos	Corrección de errores de comportamiento y daño
Bugs de interacción con el entorno	Ajustes de posición de algunos objetos y complejidad
Errores en los mensajes de tutorial	Ajustes y correcciones en los eventos de mensajes
Complejidad de las torres de vigilancia	Ajustes en el cono de visión de la torre de vigilancia.
El campo de visión de juego es reducido	Modificaciones en la posición y distancia de la cámara de manera variable.
Ajuste de la gravedad luego del salto del cachicamo	Aplicación de fuerza externa

último, la cuarta jornada duró aproximadamente 1 hora logrando alcanzar al enemigo final.

En el primer prototipo se percibió la velocidad de movimiento lenta cuando se desplazaba en forma de bola; los jugadores manifestaron sentir aburrimiento en ciertas locaciones. Se realizaron ajustes en el código referente a la física en el controlador de jugador. Por otro lado, algunos objetos eran difíciles de evadir y los jugadores pasaban mucho tiempo tratando de avanzar a la siguiente fase. Se realizaron ajustes tanto al diseño de niveles como en la programación de movimiento del jugador.

En la segunda jornada se detectó que algunos enemigos eran muy fáciles de evadir, no representaban ningún reto y el jugador podía experimentar un poco de aburrimiento. Para corregir el flujo de juego, se ajustaron los parámetros de velocidad de persecución, la posición donde comienza la persecución colocándolo más cerca y el momento cuando se activaba la persecución. Además, la distribución de algunos puntos de salvado (i.e. *checkpoints*) no estaba balanceada de acuerdo con la dificultad de algunas áreas, el jugador podía perder de manera recurrente en zonas de alta complejidad, y siempre debía regresar a un punto anterior muy distante. Para corregir esto, se añadieron nuevos checkpoints.

En la tercera jornada se detectaron bugs de interacción con el entorno y con enemigos. Algunos objetos de tipo trampa de caza no se activaban de manera oportuna. Los algoritmos de los comportamientos fueron cambiados. El comportamiento de Patrullaje generaba un bug en ciertos momentos cuando había transición en su máquina de estados. El comportamiento de Persecución tuvo un ajuste en la detección de colisiones con el entorno evitando quedar en una posición fija sin moverse.

En la cuarta jornada se detectó un bug de interfaz de usuario que no permitía ocultar los mensajes de tutoriales una vez que el jugador avanzaba por los niveles. Se detectó que

el campo de visión de la torre de vigilancia era pequeño, permitiendo al jugador evadirla fácilmente. Igualmente, se agregó un sistema de cámara dinámica para que el jugador pudiera visualizar algunos objetos próximos a la cámara, con la finalidad de tener un tiempo de anticipación ante enemigos y obstáculos. La cámara inicialmente seguía al jugador ubicándolo en el centro de la pantalla. En cuanto al salto del cachicamo, se hizo nuevamente un ajuste en su caída libre luego del salto, esta vez se aplicó una fuerza externa con la misma dirección de la gravedad, pero con una magnitud superior. Este último cambio implicó realizar una prueba total de todos los niveles diseñados para ajustar los objetos y parámetros cuya interacción se viera afectada luego de estas modificaciones.

Durante las jornadas de *playtesting* se observaron las reacciones de los participantes al momento de probar los prototipos. Se definieron tres criterios con rangos diferentes de respuestas (ver Tabla II) con la finalidad de cuantificar la calidad del videojuego.

Tabla II: Definición de Criterios

Criterio	Rango de Respuestas
Apreciación	Nada (0), Poco (1), Indiferente (2), Le agrada (3), Encantado (4)
Dificultad	Muy fácil (0), Fácil (1), Equilibrado (2), Difícil (3), Muy Difícil (4)
Estética	Desagrado (0), Indiferente (1), Conformar (2), Le agrada (3), Encantado (4)

En el criterio de *Apreciación* se evalúa la impresión general percibida en el jugador en cuanto a su vivencia de experiencia esencial del juego. El criterio *Dificultad* permite evaluar el equilibrio de la complejidad del juego en relación con las habilidades que el jugador pueda desarrollar en su interacción con el juego. El criterio *Estética* evalúa la aceptación de los elementos artísticos (entorno, personajes, animaciones, efectos visuales, música) por parte del jugador.

De acuerdo con las reacciones y comentarios de los jugadores, se estimó la valoración para cada uno de los criterios, en algunos casos se interrogó directamente al jugador la puntuación. Los resultados obtenidos fueron promediados para cada jornada y presentados en la Figura 13. En las primeras jornadas de *playtesting*, la dificultad recibió valoraciones altas, esto fue equilibrado basado en las observaciones de los jugadores (II), disminuyendo la curva de dificultad en las siguientes jornadas. Así mismo, el criterio de estética recibió valoraciones más bajas en las primeras jornadas de *playtesting*, debido a que había pocos elementos de arte incorporados al juego en los primeros prototipos, a medida que estos se iban integrando al juego en los siguientes prototipos, las valoraciones de los jugadores fueron más positivas.

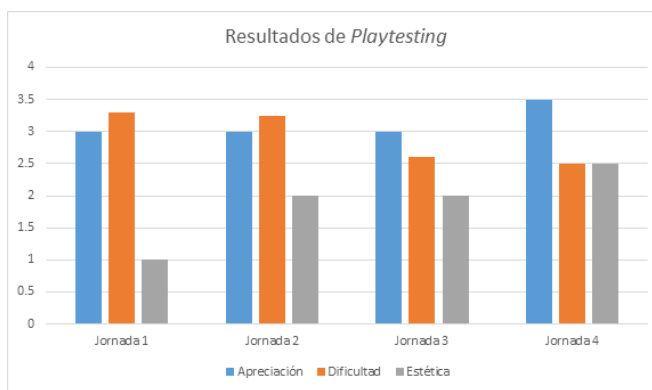


Figura 13: Gráfico de Resultados de *Playtesting*

Finalmente, el *playtesting* realizado permitió validar la experiencia esencial del juego basado en las impresiones generales que manifestaron los jugadores al probar los prototipos, esto es verificable gracias a los resultados del criterio de Apreciación. La manera como se introducen los enemigos y los obstáculos, los diferentes ambientes por los que transita el cachicamo, la información transmitida a través de los *Cut Scenes* y el enfrentamiento del cachicamo con el enemigo final, son elementos que definitivamente permiten al jugador experimentar lo que el juego busca transmitir. Así, entender la realidad de esta especie amenazada, se puede visualizar a través de una experiencia lúdica divertida.

V. CONCLUSIONES

La producción de un videojuego es un trabajo de gran envergadura en tanto a la diversidad de tareas que convergen en el desarrollo del proyecto, que lo diferencian del proceso de producción de otro tipo de software. En un videojuego hay un componente artístico de gran peso, aunado al diseño de juego siendo este último un elemento fundamental, incluso por encima de la programación del videojuego.

El desarrollo del videojuego Cachicamo busca concienciar a través de una experiencia lúdica, a los potenciales jugadores en la conservación de los cachicamos como especie

amenazada. El videojuego desarrollado es de género de plataformas con *puzzles*, cuya dinámica de acción conlleva al uso de un estándar de mecánicas que mantienen al jugador activo e interesado, y al mismo tiempo bajo un estado de tensión constante debido al constante riesgo que el personaje principal muera, víctima de algún enemigo o daño del entorno.

La dinámica planteada, está enmarcada dentro de la temática de conservación del cachicamo, en tanto que el jugador toma el rol del animal, enfrentándose a todas estas amenazas, generando en el jugador deseos de supervivencia. Las dificultades que experimenta el jugador representan cada una de las amenazas que hacen vulnerables a los cachicamos, y son presentadas paulatinamente tal que el jugador pueda ir hilando esta meta-narrativa, y en consecuencia sensibilizándose con la problemática de conservación del cachicamo.

Para que la dinámica de juego resulte una experiencia lúdica agradable al tiempo que presenta la meta-narrativa de manera idónea, se creó un diseño de niveles robusto con una buena curva de interés y con un flujo de juego adecuado. El diseño contempló una cuidadosa presentación de cada uno de los elementos narrativos y de arte, que permitieran al jugador identificar los entornos en donde se desenvuelve el cachicamo y sus posibles amenazas. Además, fueron incluidos mensajes complementarios que permiten al jugador conocer otros aspectos descriptivos de los cachicamos y sus amenazas, y finalmente recibir el mensaje conservacionista más directamente. Los algoritmos de inteligencia artificial desarrollados permitieron crear comportamientos adecuados a los enemigos, acordes al diseño de juego y al contexto temático del mismo.

Fue posible validar la experiencia esencial del juego gracias a las jornadas de *playtesting*, donde se pudo constatar como el jugador identificaba los elementos narrativos del juego, identificándose con el cachicamo y aprendiendo algo de la realidad de esta especie amenazada, a través de una experiencia lúdica divertida.

Como parte de los trabajos a futuro se plantea mejorar la experiencia lúdica para el jugador y mejorar la estética del juego al que se ajuste aún más al tipo de ambiente que quiere representar, tal que simule un juego con un mejor acabado realista. Parte de esta mejora consistiría en incluir texturas y modelos 3D que se adecúen mejor a la fauna y la flora de los llanos y selvas venezolanas, y mejorar la iluminación global del juego, sombreado y otros elementos que dan un acabado más realista al juego.

REFERENCIAS

- [1] F. van der Plas. *Biodiversity and Ecosystem Functioning in Naturally Assembled Communities*, Biological Review, vol. 94, no. 4, pp. 1220-1245, 2019.
- [2] C. Navarro. *Biología 3er Año*, serie Conexos, Ed. Santillana S.A., 2014.
- [3] S. Chauvín. *La Biodiversidad en los Ecosistemas*, Serie de Cuadernos para el Aula. Ed. Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación, Argentina, 2007.

- [4] J. M. Chase, S. A. Blowes, T. M. Knight, K. Gerstner, y F. May. *Ecosystem Decay Exacerbates Biodiversity Loss with Habitat Loss*, Nature, vol. 584, pp. 238–243, 2020.
- [5] S. F. Vizcaíno, y N. Milne. *Structure and function in armadillo limbs (Mammalia: Xenarthra: Dasypodidae)*, Journal of Zoology, vol. 257, no. 1, pp. 117-127, 2002.
- [6] F. Trujillo y M. Superina. *Armadillo de los Llanos Orientales*, Ed. Fundación Omacha, 2013.
- [7] J. Rodríguez, A. García-Rawlins, y F. Rojas-Suárez. *Libro Rojo de la Fauna Venezolana*, Ed. Provita y Fundación Empresas Polar, 2015.
- [8] AVN - Agencia Venezolana de Noticias. *74 Proyectos se Ejecutan para Evitar Extinción de Especies en Venezuela*, Disponible en <https://cutt.ly/Egh4pAL>, 2013.
- [9] Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. *Estrategia Nacional para la Conservación de la Diversidad Biológica 2010-2020 y su Plan de Acción Nacional*, Disponible en shorturl.at/dqDI5, 2012.
- [10] G. Salas y F. Dueñas. *Aprendizaje Basado en Juegos como Herramienta de Educación Ambiental sobre la Fauna Nativa de Colombia*, en Proceedings del X Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctico de las Ciencias, pp. 3417-3423, 2017.
- [11] J. Machorro. *Los Videojuegos se Abren Paso como Medio para la Educación Ambiental*, Extraído de <https://bit.ly/3jcQndU>, 2019.
- [12] J. Moreno-Cadavid, S. Vahos-Mesa, y C. Mazo-Muñoz. *Videojuego para la Enseñanza del Cuidado del Agua*, Tecnológicas, vol. 22, no. 45, pp. 61-74, 2019.
- [13] A. Urdaneta y E. Ramírez. *Einalu'u: Videojuego de Simulación de Construcción y Gestión de Culturas Indígenas Prehispánicas*, Revista Venezolana de Computación (ReVeCom), vol. 6, no 1, pp. 10-18, 2019.
- [14] L. Lima, D. Torres, y E. Ramírez. *Un Juego Serio para la Preservación de la Fauna Silvestre en Peligro de Extinción en Venezuela*, en Proceedings de la 3ra Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistemas (CoNCISA), pp. 50-60, 2015.
- [15] J. Rodríguez, A. García-Rawlins, y F. Rojas-Suárez. *Libro Rojo de la Fauna Venezolana*, 4ta edición, 2015.
- [16] B. López. *Juego: Historia, Teoría y Práctica del Diseño Conceptual de Videojuegos*, Ed. Alesia Games & Studies, 2014.
- [17] Silvergames. *What are Platform Games?*, Extraído de silvergames.com, Silvergames. <https://goo.gl/BLsXMD>, 2020.
- [18] S. Kent. *The Ultimate History Video Games: From Pong to Pokemon and Beyond...the Story Behind the Craze That Touched Our Lives and Changed the World*, 1ra. edición, Ed. Prima Life, 2001.
- [19] D. Boutros. *A Detailed Cross-Examination of Yesterday and Today's Best-Selling Platform Games*, Extraído de gamasutra.com, Gamasutra, <https://goo.gl/kfKNFM>, 2006.
- [20] D. Hearn, M. P. Baker, y W. Carithers. *Computer Graphics with Open GL*, 4ta edición, Ed. Pearson, 2010.
- [21] Playdead. *Limbo*, Disponible en <https://playdead.com/games/limbo/>, 2020.
- [22] E-Line Media. *Never Alone*, Disponible en <http://neveraloney.com/>, 2016.
- [23] Moon Studios. *Ori and the Blind Forest*, Disponible en <https://www.orithegame.com/blind-forest/>, 2015.
- [24] Unity Technologies. *Unity3D*, Disponible en <https://unity3d.com/>, 2020.
- [25] Epic Games. *Unreal Engine*, Disponible en <https://www.unrealengine.com/>, 2020.
- [26] Crytek. *Cryengine*, Disponible en <https://www.cryengine.com/>, 2018.
- [27] I. Millington y J. Funge. *Artificial Intelligence for Games*, 2da edición, Ed. CRC Press, 2009.
- [28] J. Schell. *The Art of Game Design: A Book of Lenses*, 1ra. edición, Ed. CRC Press, 2008.
- [29] Autodesk Inc. *Maya*, Disponible en <https://www.autodesk.com/products/maya/>, 2020.
- [30] Krita Foundation. *Krita*, Disponible en <https://krita.org>, 2020.

RGBaGris: Decolorización de Imágenes en el Dominio Espectral Empleando CIELab

Irena Cabanach Dresden¹, Esmitt Ramírez^{1,2}
iresaku@hotmail.com, esmitt.ramirez@ciens.ucv.ve

¹ Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

² Centre de Visió per Computador, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España

Resumen: La transformación de imágenes de color a escala de grises (e.g. decolorización) conlleva a una pérdida inevitable de información a nivel perceptual, es decir, el nivel de intensidad que representa un color respecto a su entorno se pierde. Muchas de las aplicaciones de edición de imágenes ofrecen soluciones para la decolorización, sin embargo, no consideran el problema a nivel perceptual. Así, la implementación y evaluación de un algoritmo que arroje un resultado perceptualmente acertado es un tema para considerar. Una técnica simple para la decolorización que considera la información perceptual, consiste en extraer el canal de luminancia de una imagen. Un algoritmo de decolorización más preciso, se basa en utilizar la transformada de Fourier para calcular las magnitudes de los cambios entre los canales de color utilizados en todas las escalas espaciales y realizar modificaciones con operaciones aritméticas sencillas, como agregar contrastes cromáticos a la intensidad de grises. Es precisamente este enfoque el empleado en este artículo: RGBaGris, un enfoque para la decolorización de imágenes en el dominio espectral usando la transformada de Fourier, en el espacio CIEL*a*b*. RGBaGris plantea el cálculo automático de coeficientes de control que actúan sobre el resultado en escala de grises. Esto se presenta en una interfaz gráfica que permite manipular los valores de los coeficientes, mostrando su efecto en tiempo real sobre una imagen. Para las pruebas realizadas, se realizan evaluaciones perceptuales mediante encuestas, utilizando el paradigma 2AFC y el índice C2G-SSIM. Para estos paradigmas se utilizan 20 imágenes a color y 10 conversiones a escala de grises para ambas; resultantes de aplicar los distintos valores de coeficientes en el algoritmo (manuales, automáticos y la combinación de ambos), así como su valor de luminosidad..

Palabras Clave: Color a Escala de Grises; Decoloración del Espectro; Transformada de Fourier; CIEL*a*b*; Thurstone.

Abstract: Image transformation from color images to grayscale (e.g. decolorization) leads to an inevitable loss of information at the perceptual level, that is, the intensity level that color represents with respect to its environment is lost. Different image editing applications offer solutions for decolorization, however, these applications do not consider the visual perception problem. Thus, the implementation and evaluation of an algorithm that produces a perceptually correct result is a subject to consider. A simple decolorization technique that considers the perceptual information is the extraction of the luminance channel from an image. A more precise decolorization algorithm is based on using the Fourier transform to calculate the magnitudes of the changes between the color channels used at all spatial scales and to apply modifications with simple arithmetic operations, such as adding chromatic contrasts to the intensity of gray. It is precisely that approach used in this article: RGBaGris, an approach for the decolorization of images in the spectral domain using the Fourier transform, in the CIEL*a*b* space. RGBaGris proposes the automatic calculation of coefficients of control that modify the result in grayscale. This approach is shown in a graphical interface allowing the manipulation of the values of the coefficients, showing their effect in real-time on an image. For the tests, perceptual evaluations are carried out through surveys, using the 2AFC paradigm and the C2G-SSIM index. In this way, 20 color images and 10 grayscale conversions are used for both; the result of the application of the different coefficient values in the algorithm (manual, automatic, and the combination of both), as well as their luminosity value.

Keywords: Color to Grayscale; Decolorization of Spectrum; Fourier Transform; CIEL*a*b*; Thurstone.

I. INTRODUCCIÓN

En nuestra sociedad actual, el uso de las imágenes se ha convertido en un elemento de importancia constante. Las imágenes pueden ser empleadas con fines recreativos, comerciales, académicos, artísticos, científicos o médicos. Su alcance a través de los medios informáticos y su manipulación digital es una tendencia común por las facilidades de acceso, manipulación y los bajos costos que conlleva, por lo que su estudio y desarrollo están en constante crecimiento.

Se puede decir que la mayoría de las imágenes adquiridas empleando cámaras, escáneres y dispositivos electrónicos son a color, mientras que las imágenes en escala de grises son obtenidas a través de la fotografía profesional, por una posterior manipulación digital de una imagen a color o capturadas con dispositivos de adquisición particulares. Las imágenes en escala de grises se emplean en sistemas médicos, periódicos, revistas, fotocopias, impresiones, reconocimiento de patrones, entre otros. Así, con frecuencia es necesaria la conversión de una imagen de color a escala de grises.

El caso ideal de una conversión supone la distinción visual de todos elementos presentes (i.e. valores lumínicos) en la imagen en relación a su entorno (i.e. luminancia). Esta distinción, conocida como percepción visual, está presente como parte de la información cromática de una imagen. La asignación de un conjunto 3D (i.e. espacio de color RGB) a un conjunto 1D (i.e. escala de grises), también llamada decolorización, conlleva conversiones de dos colores perceptivamente contrastados en uno solo, desapareciendo la diferencia cromática en los resultados. Las técnicas de conversión buscan mantener la mayor cantidad de información original para conseguir un resultado perceptualmente acertado, emulando las impresiones tanto locales como globales de la imagen. Se espera que los contrastes locales no sean ni exagerados ni subestimados, que los valores de grises sean ordenados según la apariencia del color y que las diferencias en los detalles espaciales sean imperceptibles. Si el proceso de decolorización no es adecuado puede llevar a una baja calidad en algunos procesos de impresión en escala de grises, o análisis erróneos de imágenes en la determinación de patrones.

Algunas técnicas tratan la decolorización como un problema de optimización [1], [2], buscando la correspondencia óptima color-a-gris que mantenga el contraste en un espacio global, local o de forma pseudoaleatoria dentro de la imagen. Además del tipo de problema, la decolorización puede realizarse en distintos dominios de trabajo de una imagen como RGB, dominio espectral, wavelets, entre otros. Una característica de estas técnicas es su nivel de complejidad para su ejecución y los recursos necesarios para su cómputo.

En la literatura, existen diversos algoritmos para la transformación de imágenes de color a escala de grises que buscan el resultado óptimo, consiguiendo excelentes aproximaciones. Algunos de éstos muestran opciones que permiten la manipulación de los resultados a través de la modificación de parámetros, sin embargo, la mayoría son algoritmos propietarios de programas de edición (e.g. Photoshop, GIMP).

En este trabajo se presenta RGBaGris, una propuesta para la decolorización de imágenes de color a escala de grises basada en la transformada de Fourier que permite el control de ciertos parámetros: el contraste cromático y de luminancia, mostrando los cambios en tiempo real. Nuestra propuesta se basa en el algoritmo propuesto por Zhao y Tamimi [3] donde emplean la transformada de Fourier sobre el espacio CIE $L^*a^*b^*$ [4] de la imagen a color (espacio independiente del dispositivo de despliegue; y, desde este punto en adelante, se escribirá CIELab por simplicidad), junto con los dos parámetros de control para modificar la transformación en escala de grises. Nuestro aporte principal consiste en:

- Implementación de lo propuesto en [3] para la modificación de los parámetros de control del grado cromático de una imagen.
- Interactividad en los parámetros de control a través de una GUI, mostrando el resultado en tiempo real.
- Aplicación de métricas de evaluación de calidad tanto objetivas como subjetivas en las pruebas realizadas.

El contenido de este artículo se organiza de la siguiente manera: En la Sección II se presentan algunos algoritmos de transformación de color a gris. La Sección III muestra de forma detallada nuestra propuesta, RGBaGris, como un algoritmo de decoloración empleando la Transformada de Fourier (i.e. dominio espectral). La Sección IV presenta un resumen de las métricas de evaluación de calidad resultado, enfocados en la decolorización de imágenes. Posteriormente, en la Sección V se muestran las pruebas y los resultados obtenidos en nuestras evaluaciones. Finalmente, en la Sección VI se presentan las conclusiones y trabajos a futuro.

II. TRANSFORMACIÓN DE COLOR A ESCALA DE GRISES

La conversión de imágenes de color a escala de grises se puede realizar a través de diferentes cálculos que conllevan a la reducción de los datos del color de tres dimensiones a una dimensión. Kanan y Cottrell [5] agrupan y comparan 13 enfoques distintos para la transformación de color a escala de grises basados en la luminosidad y luminancia. En su enfoque, consideran los distintos espacios de color para representar una imagen como CIELab, RGB, HSL, HIV, YIQ, entre otros.

Keith [6] define una serie de algoritmos básicos y comúnmente empleados en la conversión de imágenes a color a escala de grises. Quizás, el algoritmo más simple es el basado en el cálculo del promedio, denominado promedio ingenuo, que calcula el valor de la escala de grises ($G_{Intensity}$), como el promedio de los canales RGB de una imagen (ver ecuación 1).

$$G_{Intensity} = \frac{1}{3} \times (R + G + B) \quad (1)$$

Otra propuesta es el algoritmo de Luminosidad HSL (*Lightness HSL*), donde el valor de la escala de grises (G_{Luster}) se calcula extrayendo la luminosidad de la representación HSL de la imagen. Dicho valor es la media entre el máximo y el mínimo de cada canal de color. Un canal es descartado de cada píxel y los valores restantes se promedian, perdiendo la

información en términos del valor de color que se descarta del píxel. Se le denomina *luster* para diferenciarlo del canal de luminosidad del espacio de color CIELab, y se define en la ecuación 2.

$$G_{Luster} = \frac{1}{2} \times \max(R, G, B) + \min(R, G, B) \quad (2)$$

El algoritmo de la Luminancia (*Luminance*) [7] es otra propuesta diseñada para que el resultado de la escala de grises ($G_{Luminance}$) coincida con la percepción humana del brillo. En la ecuación 3 se muestra su cálculo, donde se emplea una combinación ponderada de los canales RGB.

$$G_{Luminance} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (3)$$

De hecho, la luminancia es el algoritmo estándar utilizado por diversos software de procesamiento de imágenes como GIMP, o en lenguajes de programación como Matlab donde se implementa con la función **rgb2gray**. Por otro lado, este algoritmo se emplea en aplicaciones de Visión por Ordenador [8]. Un valor similar a $G_{Luminance}$ es el valor G_{Luma} (ver ecuación 4), el cual es aplicada para la corrección gamma en dispositivos HDTV.

$$G_{Luma} = 0.2126 \times R + 0.7152 \times G + 0.0722 \times B \quad (4)$$

Finalmente, la Luminosidad (*Lightness*) es una representación perceptualmente uniforme de la escala de grises utilizada en los espacios de color de CIELab y CIELuv. La ecuación 5 indica que la luminosidad se corresponde estrechamente a la percepción humana, y que se consigue mediante la transformación no lineal del espacio de color.

$$G_{Lightness} = \frac{1}{100} \times (116 \times f(Y) - 16) \quad (5)$$

donde $Y = G_{Luma}$, y $f(t)$ se presenta en la ecuación 6.

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & \text{si } t > 0.008856 \\ 7.787 \times t + 16/116, & \text{otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

Es importante destacar que el rango de luminosidad se normaliza a $[0, 1]$ en lugar del rango usual de 0 a 100. En la Figura 1 se puede observar una comparación cualitativa de los algoritmos descritos dadas tres imágenes a color.

Sowmya et al. [9] desarrollaron una revisión detallada de diversos trabajos en el proceso de conversión de color a escala de grises enfocado en el procesamiento de la crominancia de las imágenes. En dicho trabajo se presentan técnicas de extracción de características y las comparaciones entre las técnicas.

III. ALGORITMO DE DECOLORACIÓN ESPECTRAL

En el trabajo realizado por Zhao y Tamimi [3] se presenta una alternativa para la decolorización preservando el contraste cromático. Nuestra propuesta, RGBaGris, emplea la estructura básica de transformación propuesta en dicho trabajo donde

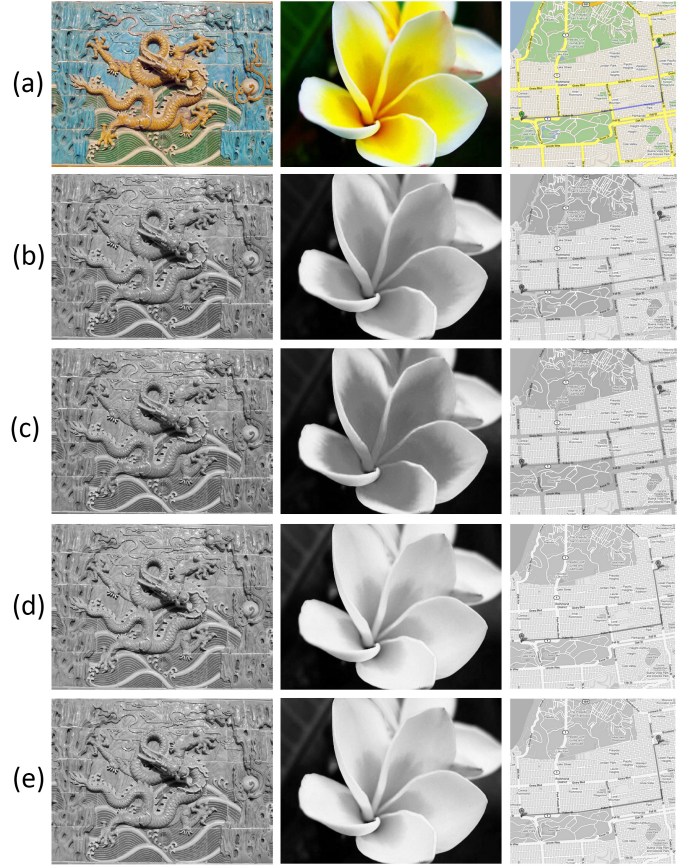


Figura 1: Comparación Cualitativa de los Algoritmos de Transformación de Color a Escala de Grises. (a) Imágenes a Color, (b) Promedio Ingenuo, (c) Luminosidad HSL, (d) Luminancia y (e) Luminosidad

se introduce el contraste cromático en una imagen en escala de grises, dentro del dominio espectral. La técnica define el espacio CIELab de la imagen empleando, entre otros, dos parámetros de control para el grado de contraste cromático y la proporción de luminosidad. En el espacio CIELab, es posible extraer de una imagen su valor de luminosidad L , que va desde el negro al blanco, y los valores a y b , que indican las intensidades de rojo a verde, y el gradiente del azul respectivamente.

Desviándose del espacio de píxeles de una imagen, la preservación del contraste se basa en una imagen transformada en el espacio de frecuencia. La transformación calcula inherentemente la magnitud de los cambios entre los canales (e.g. el contraste), en todas las escalas espaciales. Entonces, solo se necesitan operaciones aritméticas sencillas para añadir diferencias cromáticas a la intensidad final de escala de grises.

Este algoritmo propone una decoloración que provee la preservación controlable del contraste en todas las escalas espaciales. Así se calcula la transformada de Fourier en el canal de luminosidad L , y en los dos canales cromáticos, a y b , de una imagen del espacio CIELab. Los valores transformados se pueden representar como \hat{L} , \hat{a} y \hat{b} , los cuales están rela-

cionados con los índices espaciales del cambio de intensidad en todas las escalas espaciales. Cada frecuencia del espectro (e.g. la magnitud) refleja el nivel de contraste en cada escala correspondiente entre los tres componentes de la imagen. Una imagen en escala de grises de la correspondencia de luminancia puede ser recuperada de una transformación inversa de Fourier de \hat{L} .

Este método implementa la decolorización aumentada modificando \hat{L} incorporando compensación de \hat{a} y \hat{b} . Posteriormente la transformada inversa logra una la imagen en escala de grises preservando las diferencias visuales de luminancia y crominancia. Esto corresponde un factor clave en la decolorización ofreciendo un esquema para calcular dos coeficientes empleados en la adición del contraste cromático con el contraste de luminancia: (1) un coeficiente para definir el grado del contraste cromático a ser incorporado, y (2) un coeficiente para determinar los diferentes niveles de contraste cromático de dos canales diferentes respectivamente.

A. Optimización del Contraste

Al efectuar la transformada de Fourier para cada canal (L , a , b), del modelo CIELab, en una imagen a color I , se obtienen tres imágenes espectrales denominadas como \hat{L} , \hat{a} y \hat{b} . El proceso para lograr una imagen en escala de grises G_I es a través de la transformación inversa de \hat{L} : $G_I = IF(\hat{L})$, donde $IF()$ representa la inversa de la transformada de Fourier. Así, se introduce el contraste cromático en una imagen en escala de grises **mejorada**, \hat{G}_I en el dominio de la frecuencia. De este modo, \hat{G}_I se calcula la transformada inversa de Fourier como:

$$\hat{G}_I = IF(\hat{E}) \quad (7)$$

En la ecuación 7, I representa la imagen a color y \hat{E} la escala de grises modificada en el dominio de la frecuencia. Por su parte, la imagen \hat{E} se construye de la siguiente forma:

$$\hat{E} = \hat{H}(\hat{L}, \hat{a}, \hat{b}) \quad (8)$$

La función \hat{H} calcula una intensidad de la escala de grises modificada en el dominio de la frecuencia \hat{E} a partir de las contrapartes del dominio de la frecuencia del canal de luminancia original y sus dos canales cromáticos (ver ecuación 8). Ahora, solo queda definir el cálculo de \hat{H} , la cual se debe implementar en cada frecuencia como:

$$\hat{H}(\hat{L}, \hat{a}, \hat{b}) = (1 - \hat{\theta})\hat{L} + \hat{\theta}(\hat{\phi}\hat{a} + (1 - \hat{\phi})\hat{b}) \quad (9)$$

En la ecuación 9 el coeficiente $\hat{\theta}$ controla el grado del contraste cromático incorporado al resultado en escala de grises, y $\hat{\phi}$ representa el coeficiente para determinar las contribuciones relativas de los canales a y b . Todos los valores de Fourier y coeficientes son dependientes de la frecuencia, y son omitidos en la ecuación por simplicidad de esta.

B. Control de Parámetros

Los coeficientes $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$ determinan cambios en el contraste en los resultados en escala de grises. De hecho, éstos valores pueden calcularse automáticamente de acuerdo con los valores obtenidos en el espectro de Fourier. Por su parte, $\hat{\theta}$ modela el grado del contraste cromático incorporado que se relaciona con la pérdida relativa de conversión, la cual es medida por la diferencia ponderada de RGB y la diferencia de luminancia. En nuestra propuesta, definimos estas diferencias como se muestra en la ecuación 10. Cabe destacar que dicha operación se debe realizar por cada frecuencia de los valores complejos obtenidos. La ecuación modela una estabilidad para el contraste, y para su cálculo nos basamos en la ecuación 3 de luminancia.

$$\hat{\theta} = 1 - \frac{|\hat{L}|}{|\hat{R}| \times 0.299 + |\hat{G}| \times 0.587 + |\hat{B}| \times 0.114} \quad (10)$$

Nótese que en la ecuación 10, el símbolo $|\dots|$ representa el espectro de los valores complejos y \hat{R} , \hat{G} , \hat{B} los resultados de la transformada de Fourier de los canales R , G , B .

Por otro lado, el coeficiente $\hat{\phi}$ se calcula por la proporción relativa del espectro a y b como se muestra en la ecuación 11. Para conseguir la consistencia y estabilidad global, el término $\hat{\phi}$ es modificado de la propuesta en [3]. Esta decisión se obtuvo luego de desplegar los resultados para $\hat{\phi}$ en el rango de valores de un conjunto de imágenes en escala de grises, evitando mínimos locales para ciertos valores que ocurren en la versión original.

$$\hat{\phi} = \frac{|\hat{a}| - |\hat{b}|}{|\hat{a}| + |\hat{b}|} \quad (11)$$

Tanto $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$ pueden ser calculados automáticamente en cada frecuencia y aplicarse en la ecuación (9). Sin embargo, desde el punto de vista de implementación, estos valores pueden ser promediados en todas sus frecuencias o asignadas de forma manual. De hecho, es posible hacer una ponderación de cada frecuencia de acuerdo con criterios de magnitud o fase. En este trabajo se emplea la opción manual para controlar los parámetros acorde con el resultado visual inmediato.

En la Figura 2 se pueden observar algunos ejemplos de comparación del canal L de CIELab (Figura 2(a)) y de RGBaGris (Figura 2(b)). Dado que nuestra propuesta se basa en valores manuales para $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$, la Figura 2(b) puede variar. Esta variación se obtuvo a través de una interfaz gráfica que se explica en la siguiente sección.

C. Implementación

Para la implementación del algoritmo se empleó el lenguaje de programación C++ junto con la biblioteca OpenCV [10]. Para el control de los parámetros de forma manual, se optó por desarrollar una interfaz gráfica que muestre en tiempo real los resultados. La interfaz fue realizada usando la biblioteca Qt (<https://www.qt.io>) junto con la herramienta Qt Creator.

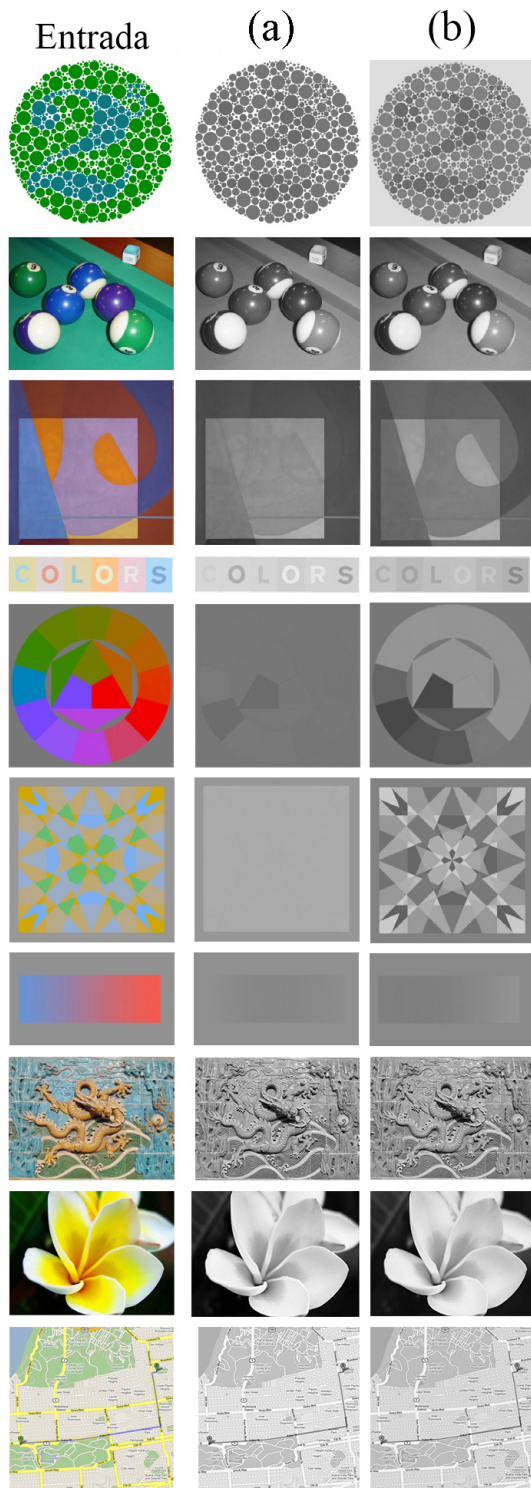


Figura 2: Comparación del (a) Canal L de CIELab vs. (b) RGBaGris con los Parámetros Promediados

El algoritmo originalmente fue desarrollado en su etapa conceptual en Matlab [11]. De hecho, una vez los resultados fueron ajustados acorde a lo esperado, se realizó la migración al lenguaje C++. El código fuente se encuentra disponible para su uso abierto en el repositorio público Github¹. Igualmente,

¹<https://github.com/irenita/ImplementacionDecolorizacionEspectral>

una demostración de la utilización de RGBaGris se encuentra alojada en un vídeo en la plataforma Youtube².

En la Figura 3 se observa una interfaz para la decolorización de una imagen a color. Los valores de los coeficientes θ , ϕ se pueden modificar en el rango $[-3, +3]$ y $[-5, +5]$ respectivamente. Igualmente, el valor de luminosidad es posible variarlo dentro del rango $[-1, +1]$. También, es posible que los coeficientes se calculen de forma automática por cada frecuencia, o un promedio de cada una.

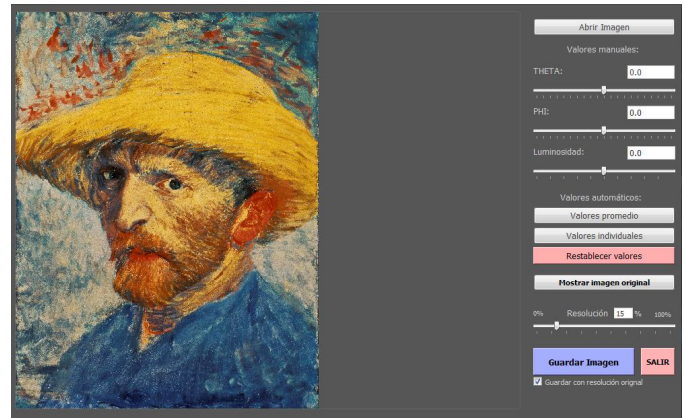


Figura 3: GUI Propuesta para el Despliegue de la Imagen y Control de sus Parámetros en Tiempo Real

Un detalle interesante que se presenta en la GUI es la resolución de la imagen. Un valor porcentual reduce la imagen aplicando interpolación bilineal afectando directamente el resultado generado por los coeficientes. Esto se debe a que existe una menor cantidad de píxeles que aumentan o disminuyen una frecuencia en el espectro de Fourier. Empleando la GUI fue posible crear una serie de pruebas que evalúan la calidad de una imagen y permiten obtener una métrica adecuada. Dichas pruebas y sus resultados se presentan a continuación.

IV. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD

RGBaGris es evaluada para determinar si genera una escala de grises perceptualmente aceptable tal que maximice la percepción visual. Para ello, se emplea una evaluación de la calidad de la imagen, *image quality assessment* (IQA), propuesta por Gupta et al. [12] que las divide en dos categorías: evaluación subjetiva y evaluación objetiva.

Métrica Subjetiva

La evaluación subjetiva de la calidad se considera un método confiable de evaluación de la calidad y, a menudo, se emplea para recopilar puntajes de calidad. Según Zerman et al. [13], se pueden emplear métodos de calificación directa (*rating*) y de clasificación (*ranking*), donde los métodos de clasificación solicitan a los observadores comparar dos o más estímulos y sean ordenados según su calidad. El método de clasificación más empleado es la comparación por pares debido a la

²https://www.youtube.com/watch?v=Bk_7erReW8E

simplicidad de la tarea y la consistencia de los resultados.

En la comparación por pares solo se muestran dos imágenes a la vez y se le solicita a un participante que elija una de ellas de acuerdo con algún criterio (e.g. más agradable visualmente, más bonita, etc.), permitiendo de esta forma medir un atributo perceptivo de interés. Sin embargo, Brown y Peterson [14] proponen presentar todos los pares posibles de elementos a cada encuestado, tal que se elija el par de elementos que mejor satisfaga un criterio de elección. De esta forma, es posible calcular valores de escala en una tarea experimental sencilla con el fin de tener errores de medición bajos (en comparación con el *rating*).

En RGBaGris se emplea el enfoque de Ćadić [15] donde se especifica un experimento subjetivo perceptual para evaluar las conversiones de imágenes de color a escala de grises, llamado experimento de precisión. Las imágenes en escala de grises se presentan junto con la imagen en color original (referencia). Dicho experimento se realiza utilizando la técnica psicofísica de comparaciones por pares conocida como el paradigma de experimentos 2AFC (*two alternatives forced choice* - elección forzada de dos alternativas). Así, cada vez se van presentando dos imágenes en escala de grises junto con la de color original en el centro. Los observadores deben de seleccionar una de las dos imágenes en escala de grises que esté más cerca en apariencia de la imagen en color original, es decir, la imagen que mejor reproduzca a la original.

Ahora, los resultados de este experimento podrían ser estudiados a través de distintas técnicas, y en este trabajo optamos por la metodología de Thurstone. Thurstone postuló la existencia de un continuo psicológico, es decir, una escala unidimensional abstracta y desconocida, donde los objetos se posicionan según una característica específica de éstos que evoca una respuesta subjetiva en cada uno de los jueces. La posición de un objeto es directamente proporcional al valor del atributo, es decir, aumenta a la derecha y disminuye a la izquierda de la escala. En el ámbito de psicología de la decisión, a este metodología se le conoce como Ley del juicio comparativo de Thurstone [16], la cual aún sigue vigente en la actualidad.

El modelo de Thurstone proporciona un método para estimar la diferencia de escala para cualquier par de opciones mediante la estimación de la probabilidad P de una opción A frente a otra B , $P(A > B)$, por la proporción empírica de personas que prefieren A sobre B . Sin embargo, al considerar más de dos opciones, este enfoque se rompe porque estos valores necesitan ser adaptados para que se ajusten a una escala unidimensional. Para solventar ello se aplica la solución propuesta en [17] donde se aplica el método de mínimos cuadrados para promediar las puntuaciones obtenidas y así determinar las puntuaciones de calidad para un conjunto de opciones.

Métrica Objetiva

Una manera confiable de evaluar la calidad de una imagen es mediante la evaluación subjetiva. Sin embargo, es un forma

lenta, costosa y poco práctica para los sistemas de procesamiento de imágenes en tiempo real. En los últimos años ha habido un mayor interés en desarrollar métricas objetivas de la IQA que sean consistentes con las medidas de calidad perceptiva. Según la disponibilidad de una imagen original, las métricas objetivas de calidad de imagen se clasifican en, referencia completa (*Full-Reference* - FR), sin referencia (*No-Reference* - NR) y referencia reducida (*Reduced-Reference* - RR).

En un escenario como el planteado en RGBaGris, las métricas FR son las adecuadas. Enfoques como el error cuadrático medio (*mean squared error* - MSE), o índice de similitud estructural (*structural similarity* - SSIM) no se consideran adecuadas dado que las imágenes de referencia y transformadas (i.e. en escala de grises en el dominio de la frecuencia) no tienen la misma dimensión.

En [18] se propone un modelo de calidad objetivo que predice automáticamente la calidad percibida de las imágenes de un proceso C2G, de color a grises - *color to gray*. El modelo se basa en el índice SSIM, construyendo un índice de similitud estructural C2G (C2G-SSIM) que evalúa las similitudes de luminancia, contraste y estructura entre la imagen de color de referencia y la imagen convertida C2G, combinando estos componentes para obtener una medida de calidad general.

El esquema del índice C2G-SSIM se muestra en la Figura 4. Primero se transforma la imagen de color de referencia y la imagen de prueba C2G en un espacio de color. Luego, se miden las distorsiones de la luminosidad, el contraste y la estructura para capturar los cambios de calidad percibidos e introducidos por la conversión C2G. Finalmente, se combinan las tres medidas anteriores en una medida de calidad general.

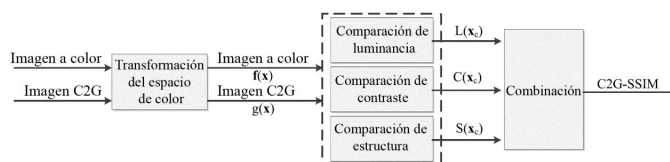


Figura 4: Esquema para el Cálculo del Índice C2G-SSIM

Es importante destacar que el índice C2G-SSIM, denominado como $Q(f, g)$ en el trabajo de Ma et. al. [18], se aplica en un espacio de color de uniformidad perceptiva (i.e. CIELab), donde la distancia euclidiana entre dos puntos de color es proporcional a la diferencia de color percibida. El valor máximo de $Q(f, g)$ es 1 que representa una mayor similitud.

Coefficientes de Correlación

Al emplear pruebas de *ranking*, es posible aplicar métricas de rendimiento objetivo como el coeficiente de correlación de Spearman (*Spearman rank correlation coefficient* - SRCC) y el coeficiente de correlación de Kendall (*Kendall rank correlation coefficient* - KRCC), donde ambos cuantifican la relación entre dos descriptores. Estas métricas permiten medir el grado de correlación entre dos valoraciones dadas, es decir, la asociación o interdependencia. Estos índices son



Figura 5: Ejemplo de Presentación de las Imágenes a los Encuestados. Dos Imágenes Transformadas de la Imagen Original, en este Caso, *Bedroom in Arles*

adecuados para medir la correlación entre los resultados de las evaluaciones de calidad subjetiva y objetiva. Estas métricas son tomadas del libro de Legendre y Legendre [19], donde se especifican dichos coeficientes de correlación.

V. EXPERIMENTACIÓN

Los experimentos fueron realizados para demostrar la efectividad de RGBaGris, aplicando evaluación subjetiva y objetiva. Así, dada una serie de imágenes y distintos tipos de conversiones, se somete a sujetos de prueba a la visualización y análisis de las imágenes. Para este proceso se considera factores como correcta iluminación, no más de 20 minutos para evitar fatiga visual, y distinto orden de entrega para evitar sesgos en los resultados. Se aplica la metodología de las combinaciones por pares 2AFC que requiere de la aplicación de encuestas, y se sigue la métrica C2G-SSIM para la evaluación subjetiva y objetiva respectivamente.

Las imágenes a color seleccionadas son un conjunto de veinte imágenes de pinturas de diversos artistas, digitalizadas en distintas resoluciones. En la Figura 6 se muestran las imágenes, de diversas fuentes dedicadas al arte que permiten su descarga libre en diferentes resoluciones. Entre las fuentes se encuentran images.nga.gov, artgallery.yale.edu, en.gallerix.ru, entre otros. En la Tabla II se muestra la descripción de las obras y la resolución empleada en píxeles.

A. Tipos de Coeficientes

Nuestra propuesta permite la manipulación de la imagen resultante en escala de grises a través de distintos coeficientes, como se describe en la Sección III-B. Entonces, se evalúa $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$ en su forma automática y manual, obteniendo las distintas combinaciones de coeficientes mostradas en la Tabla I, donde **Imagen X** identifica la imagen a la cual se le aplica los valores de los coeficientes indicados, la columna de letras **A**, **B**, ..., **J** identifican una combinación de $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$. Por ejemplo, la combinación D indica que $\hat{\theta}$ se calcula de forma individual por cada frecuencia, y $\hat{\phi}$ como el promedio de todas ellas.

Para cada una de las 20 imágenes a color a evaluar (descritas en la Figura 6) los coeficientes utilizados son únicos, es decir, no se utiliza el mismo valor de coeficiente para todas las

Tabla I: Combinación de los Coeficientes a Evaluar

	Imagen X	
	$\hat{\theta}$	$\hat{\phi}$
A	Promedio	Promedio
B	Individuales	Individuales
C	Promedio	Individuales
D	Individuales	Promedio
E	Manual	Manual
F	Promedio	Manual
G	Manual	Promedio
H	Individuales	Manual
I	Manual	Individuales
J	L de CIELab	

imágenes. El valor automático de coeficiente de tipo *Promedio* no será el mismo para la Imagen 4 que para la Imagen 12. En el caso de los valores automatizados individualmente, que genera una matriz como coeficiente, no se detalla dicha matriz para su cómputo sino que se identifica dicho coeficiente con el nombre *Individuales*.

B. Aplicación de Encuestas

Los resultados de las imágenes en escala de grises obtenidas se evaluaron de forma subjetiva empleando la técnica 2AFC [15] (explicado en la Sección IV). El experimento consiste en que cada vez se van presentando dos imágenes en escala de grises junto con la de color original en el centro, tal como se muestra en la Figura 5. Los observadores deben de seleccionar una de las dos imágenes en escala de grises que esté más cerca en apariencia de la imagen en color original, es decir, la imagen que mejor reproduzca a la original. El orden de presentación de las imágenes a evaluar y el par de selección sin orden en particular.

Se cuentan con 20 imágenes a color, 10 resultados en escala de grises por cada una de ellas y seis 6 evaluaciones por combinación de pares (entre distintos sujetos). Por imagen a color, se tienen $\frac{10 \times (10-1)}{2} = 45$ permutaciones de combinaciones por pares de resultados en escala de grises, dando un total de $20 \times 45 \times 6 = 5400$ evaluaciones de combinaciones por pares. Estas 5400 comparaciones se distribuyeron de forma pseudoaleatoria entre 30 sujetos de prueba, con un total de 180 comparaciones por participante.

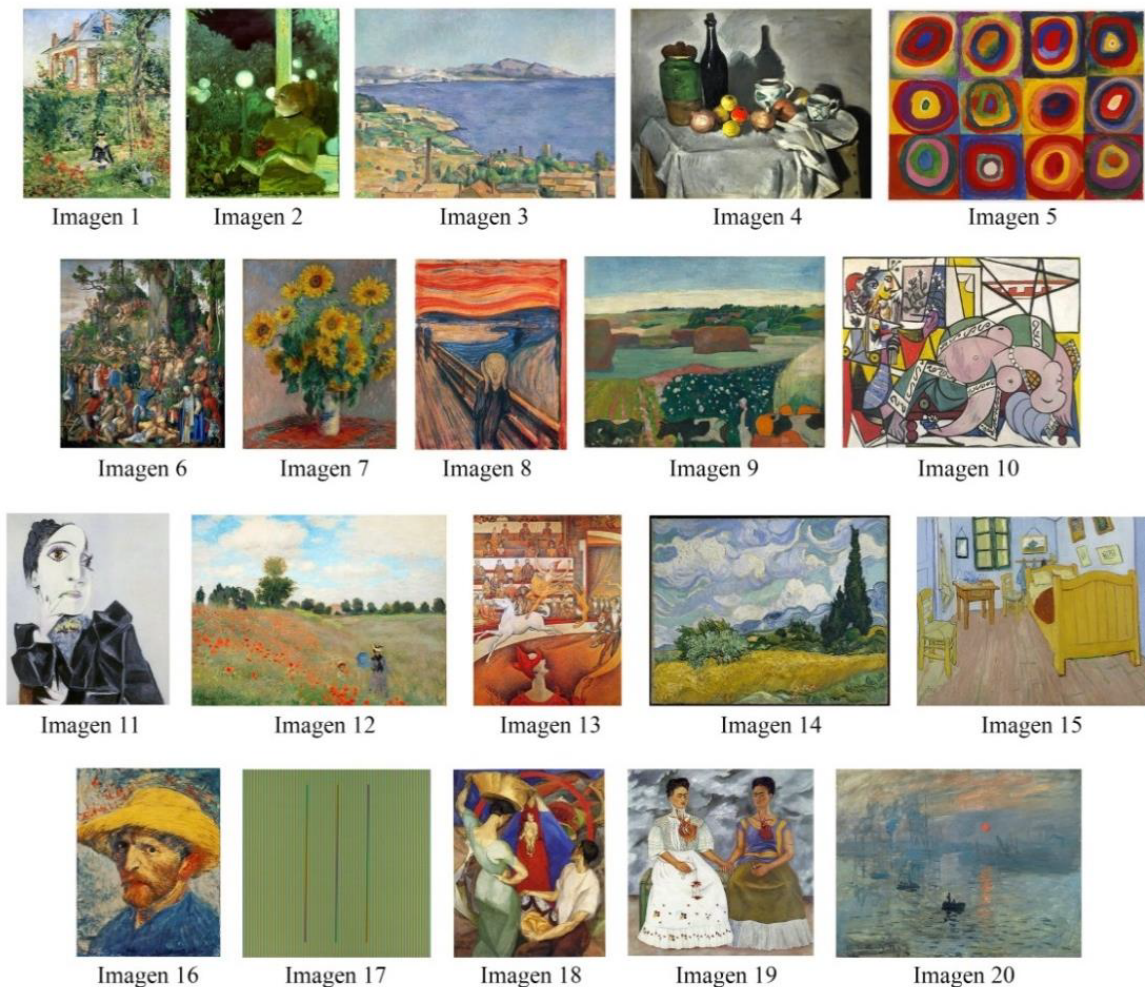


Figura 6: Imágenes Empleadas en las Pruebas de RGBaGris

Tabla II: Descripción Detallada de las Imágenes Utilizada en las Pruebas

Id	Nombre	Autor	Resolución (px.)
1	In the Garden of Bellevue	Edouard Manet	3203 x 4125
2	Cafe-Concert: The Song of the Dog	Edgar Degas	810 x 1000
3	The Gulf of Marseilles Seen from L'Estaque	Paul Cézanne	3705 x 2696
4	Fruits	Paul Cézanne	3799 x 2996
5	Color Study	Wassily Kandinsky	1067 x 797
6	Martyrdom of the Ten Thousand	Alberto Durero	2898 x 3329
7	Bouquet of Sunflowers	Claude Monet	3238 x 4000
8	The Scream (1893)	Edvard Munch	1397 x 1759
9	Haystacks in Brittany	Paul Gauguin	4000 x 3178
10	L'Atelier (Deux personnages)	Pablo Picasso	1064 x 854
11	Buste de Dora Maar	Pablo Picasso	736 x 865
12	Les Coquelicost	Claude Monet	2500 x 1870
13	The Circus	Georges Seurat	1184 x 1528
14	Wheat Field with Cypresses	Vincent Van Gogh	3811 x 3016
15	Bedroom in Arles	Vincent Van Gogh	4433 x 3500
16	Self-Portrait with Straw Hat	Vincent Van Gogh	3204 x 4200
17	Sábado	Carlos Cruz-Diez	720 x 720
18	La adoración de la Virgen	Diego Rivera	1608 x 1993
19	Las dos Fridas	Frida Kahlo	729 x 733
20	Impression Sunrise	Claude Monet	1600 x 1245

Los resultados del experimento subjetivo son estudiados a través de la metodología del escalamiento psicológico de Thurstone [20] para estimar la diferencia de puntaje de calidad para dos opciones utilizando la Ley del Juicio Comparativo (Caso V) [21], y el cálculo de Mosteller [17]: generación de la matriz de frecuencias, matrices de proporciones, matriz de puntuaciones, y promedio de las puntuaciones Z .

Para cada par de imágenes en escala de grises se obtienen 120 evaluaciones. En la Figura 7 se observan los resultados escalares obtenidos para la imagen 1, donde el mejor resultado se encuentra más a la derecha. La separación entre los puntos indica la similitud perceptual; en este caso particular, la imagen en escala de grises generada a partir de la imagen 1 a color con los coeficientes identificados con el par H (θ individual y ϕ manual) es la peor clasificada en la escala perceptual. Por su parte, la imagen en escala de grises generada con los coeficientes identificados con el par E (θ y ϕ manual) obtiene la mejor clasificación en la escala perceptual.

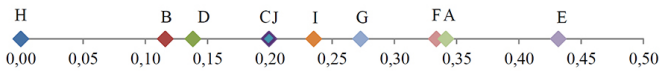


Figura 7: Evaluación Basada en Posiciones Escalares Para las Distintas Combinaciones en la Imagen 1

C. Métrica C2G-SSIM

Esta métrica se calcula en Matlab, utilizando las mismas combinaciones que en la evaluación subjetiva y se compara el resultado de ambas utilizando las métricas de correlación SRCC y KRCC. Por su parte, el cálculo de los resultados de las encuestas se realiza en Microsoft Excel para organizarlas en tablas y gráficos.

La evaluación a través de la métrica automatizada C2G-SSIM [18], se aplica para cada imagen a color y sus respectivas transformaciones en escala de grises de este trabajo. Para obtener la escala general de los índices de todas las imágenes se suman todos los resultados C2G-SSIM obtenidos por cada uno de los distintos tipos de coeficientes aplicados y se promedian entre el número de grupos evaluados.

Los resultados obtenidos permiten clasificar de forma ascendente o descendente las imágenes transformadas en escala de grises, donde el mayor índice C2G-SSIM se traduce en una mejor calidad perceptual. Un ejemplo se observa en la Tabla III, donde están los índices para la imagen 1, *In the Garden of Bellevue*.

Al igual que la escala subjetiva, los resultados obtenidos con esta métrica objetiva es dependiente de la imagen de entrada y no del tipo de coeficiente utilizado. Por simplicidad, el índice general de C2G-SSIM se reduce al promedio de todos los resultados obtenidos por cada tipo de par de coeficientes utilizado.

D. Unificación de Resultados

Los coeficientes de correlación SRCC y KRCC [19] son aplicados entre los resultados obtenidos en las encuestas y los

Tabla III: Ejemplo de Índices C2G-SSIM para la Imagen 1

	C2G-SSIM
Color vs. A	0,93610
Color vs. B	0,92970
Color vs. C	0,93610
Color vs. D	0,93030
Color vs. E	0,93280
Color vs. F	0,93610
Color vs. G	0,93700
Color vs. H	0,91600
Color vs. I	0,93680
Color vs. J	0,93590

índices C2G-SSIM para determinar el grado de interdependencia que hay entre ambas evaluaciones y poder determinar cierta consistencia en las evaluaciones subjetivas. Antes de aplicar el cálculo de los coeficientes de correlación, se asigna a cada resultado obtenido en escala de grises (letras desde la A hasta la J) correspondientes a cada grupo generado por una imagen a color, y por cada tipo de evaluación realizada (subjetiva y objetiva), un escalar del 1 al 10, que indica la posición de preferencia que ocupa cada uno de estos resultados, de forma descendente: el 1 identifica los de mayor preferencia (i.e. mejor calidad perceptual) y 10 los de menor preferencia.

Un ejemplo de esta asignación se puede observar en la Tabla IV, donde se muestran las posiciones de clasificación obtenidas para la imagen 1 por cada tipo de evaluación a través de las columnas **THURSTONE** y **C2G-SSIM**, agrupadas en la columna **RANK**, que corresponden a los resultados crudos obtenidos de los promedios de las puntuaciones Z y a los índices C2G-SSIM, agrupados en la columna **RAW**.

Tabla IV: Posiciones de la Clasificación Obtenida Para la Imagen 1 en los Resultados de las Puntuaciones Z (THURSTONE) y de los Índices C2G-SSIM

	RAW		RANK	
	THURSTONE	C2G-SSIM	THURSTONE	C2G-SSIM
Color vs. A	0,7792	0,93610	4	3
Color vs. B	0,4716	0,92970	8	9
Color vs. C	0,6424	0,93610	6	4
Color vs. D	0,3643	0,93030	9	8
Color vs. E	0,7270	0,93280	5	7
Color vs. F	0,7822	0,93610	2	5
Color vs. G	0,8895	0,93700	1	1
Color vs. H	0,0000	0,91600	10	10
Color vs. I	0,7807	0,93680	3	2
Color vs. J	0,5562	0,93590	7	6

Una vez identificadas todas las posiciones de clasificación que ocupa cada resultado en escala de grises por cada imagen a color, es posible calcular los coeficientes de correlación. En la Tabla V se presenta los resultados obtenidos de ambos coeficientes por cada grupo de transformaciones en escala de grises por imagen a color.

Para una mejor visualización de los resultados de los coeficientes de correlación obtenidos, su gráfica se muestra en

Tabla V: Resultados de los Coeficientes de Correlación entre las Evaluaciones Subjetivas y Objetivas, Junto con las Transformaciones en Escala de Grises por Imagen a Color (Ordenadas Según las Clasificaciones Obtenidas)

IMAGEN	SRCC	KRCC	Ordenando los resultados									
			mejor									peor
Imagen 1 (THURSTONE)	0,86667	0,73333	G	F	I	A	E	C	J	B	D	H
Imagen 1 (C2G-SSIM)			G	I	A	C	F	J	E	D	B	H
Imagen 2 (THURSTONE)	0,64848	0,46667	A	E	G	F	J	I	C	B	H	D
Imagen 2 (C2G-SSIM)			E	J	C	F	A	G	I	H	D	B
Imagen 3 (THURSTONE)	0,46667	0,33333	A	E	I	J	G	F	B	C	D	H
Imagen 3 (C2G-SSIM)			G	J	I	F	C	A	E	D	B	H
Imagen 4 (THURSTONE)	0,63636	0,42222	A	F	D	B	C	J	G	H	E	I
Imagen 4 (C2G-SSIM)			J	F	C	A	B	D	I	G	H	E
Imagen 5 (THURSTONE)	0,73333	0,6	C	G	I	J	A	E	F	D	B	H
Imagen 5 (C2G-SSIM)			E	G	I	J	C	A	F	D	H	B
Imagen 6 (THURSTONE)	-0,15152	-0,15556	F	E	D	A	G	C	B	I	J	H
Imagen 6 (C2G-SSIM)			J	G	I	A	C	F	D	B	E	H
Imagen 7 (THURSTONE)	0,93939	0,82222	E	J	C	A	F	B	D	H	G	I
Imagen 7 (C2G-SSIM)			E	J	F	C	A	D	B	H	I	G
Imagen 8 (THURSTONE)	0,75758	0,55556	E	G	I	A	J	F	H	B	D	C
Imagen 8 (C2G-SSIM)			E	I	G	J	F	C	A	D	B	H
Imagen 9 (THURSTONE)	0,6	0,46667	E	B	G	I	D	F	A	H	C	J
Imagen 9 (C2G-SSIM)			E	G	I	F	J	D	B	C	A	H
Imagen 10 (THURSTONE)	0,61212	0,46667	E	A	C	I	G	F	D	J	B	H
Imagen 10 (C2G-SSIM)			G	I	A	C	F	J	E	D	B	H
Imagen 11 (THURSTONE)	0,01216	0,02222	C	F	D	A	B	G	I	J	H	E
Imagen 11 (C2G-SSIM)			J	D	B	G	I	F	H	A	C	E
Imagen 12 (THURSTONE)	0,35758	0,28889	F	E	H	J	I	A	G	C	B	D
Imagen 12 (C2G-SSIM)			E	I	G	J	A	F	C	D	B	H
Imagen 13 (THURSTONE)	0,87879	0,73333	E	I	F	J	A	G	B	C	D	H
Imagen 13 (C2G-SSIM)			E	I	G	J	F	A	C	D	B	H
Imagen 14 (THURSTONE)	0,4303	0,33333	E	B	G	A	C	D	I	H	J	F
Imagen 14 (C2G-SSIM)			E	G	I	A	C	F	J	D	B	H
Imagen 15 (THURSTONE)	0,32121	0,28889	E	I	J	G	F	A	D	H	B	C
Imagen 15 (C2G-SSIM)			J	G	I	C	F	A	H	D	E	B
Imagen 16 (THURSTONE)	0,5183	0,46667	E	D	G	I	F	A	H	J	B	C
Imagen 16 (C2G-SSIM)			E	G	I	J	F	C	A	D	B	H
Imagen 17 (THURSTONE)	-0,62424	-0,46667	I	G	J	F	A	C	D	E	H	B
Imagen 17 (C2G-SSIM)			E	B	D	C	G	A	H	I	J	F
Imagen 18 (THURSTONE)	0,38182	0,24444	A	F	H	C	D	E	G	J	I	B
Imagen 18 (C2G-SSIM)			F	C	A	I	J	G	D	B	H	E
Imagen 19 (THURSTONE)	0,52888	0,42222	F	C	B	A	H	D	E	J	G	I
Imagen 19 (C2G-SSIM)			J	F	C	A	E	D	B	H	I	G
Imagen 20 (THURSTONE)	0,35758	0,24444	D	H	B	F	I	A	J	E	C	G
Imagen 20 (C2G-SSIM)			J	D	B	C	A	F	H	I	G	E

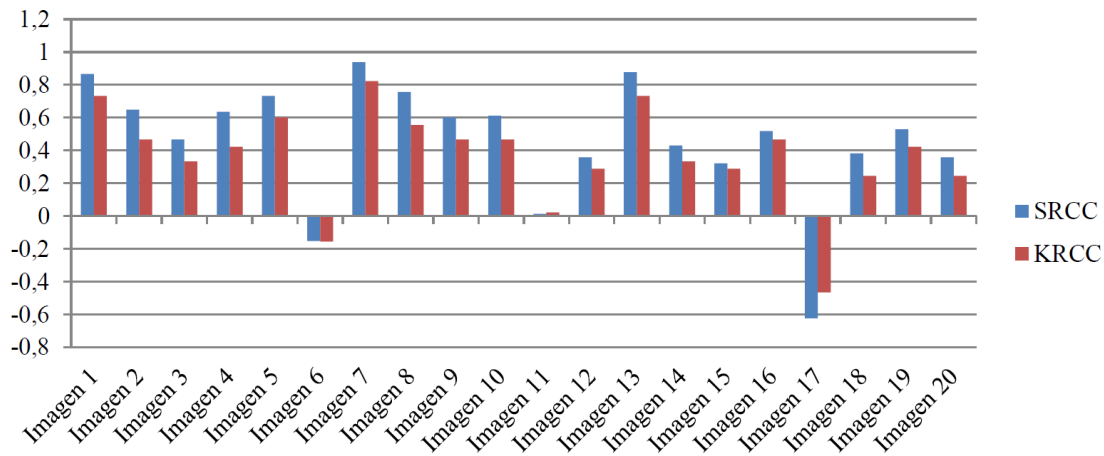


Figura 8: Coeficientes de Correlación SRCC y KRCC para las Imágenes Evaluadas

la Figura 8, donde se detalla que las imágenes 6, 11 y 17 presentan una relación entre la evaluación subjetiva y objetiva es inversa o indistinguible. Esto representa que hay una alta discrepancia entre los resultados subjetivos y objetivos para esos casos, analizando podemos deducir algunos factores de impacto:

- Imagen 6: su complejidad visual, con numerosos detalles y alta resolución.
- Imagen 11: pocos colores y pocos detalles de contraste visual
- Imagen 17: su baja resolución y calidad de compresión para la complejidad de sus detalles, originando confusión visual en la percepción de las líneas; lo que podría originar selecciones aleatorias por parte de los encuestados, impidiendo una relación directa con el cálculo de calidad objetivo de C2G-SSIM.

La Tabla V pone en evidencia que ningún tipo de coeficiente aplicado al algoritmo de transformación propuesto arroja la misma calidad perceptual para las imágenes a color dadas; dependiendo de la imagen a color dada la clasificación de cada tipo de coeficiente varía al menos en una posición, siendo necesario analizar el comportamiento de los resultados para cada imagen a color con sus correspondientes transformaciones en escala de grises.

Es posible afirmar que las transformaciones en escala de grises obtenidas aplicando los coeficientes identificados como E ($\bar{\theta}$ manual y $\bar{\phi}$ manual), presentan el resultado con mayor calidad perceptual para las imágenes 2, 7, 8, 9, 12, 13, 14 y 16, mientras que se presenta el caso opuesto (peor calidad perceptual) para la imagen 4; también se observa que para la imagen 15 obtiene la mayor calidad perceptual en la métrica subjetiva y la peor calidad perceptual en la métrica objetiva.

Dentro de los resultados con los coeficientes automatizados consideramos que:

- El tipo de coeficiente identificado como A (es decir, $\bar{\theta}$ promedio y $\bar{\phi}$ promedio), nunca es clasificado con la peor calidad perceptual y obtiene las mejores clasificaciones para las evaluaciones subjetivas en las imágenes 2, 3, 4 y

18, y supera las clasificaciones de los tipos de coeficientes identificados como B y J, tanto para las evaluaciones subjetivas como objetivas, en las imágenes 1, 10 y 18.

- El tipo de coeficiente identificado como B (es decir, $\bar{\theta}$ individuales y $\bar{\phi}$ individuales), a pesar de no obtener ninguna clasificación sobresaliente, para las imágenes 9 y 20 supera la obtenida por tipo de coeficiente identificado como A, tanto en las evaluaciones subjetivas como objetivas.
- El tipo de coeficiente identificado como C (es decir, $\bar{\theta}$ promedio y $\bar{\phi}$ individuales) logra superar las clasificaciones obtenidas por el tipo de coeficiente identificado como A en las imágenes 5, 7 y 19.
- En relación a la transformación identificada como J (canal L de CIELab), en las imágenes 7, 12, 13 y 15, supera las clasificaciones obtenidas por los tipos de coeficientes automatizados identificados como A, B, C y D, tanto en las evaluaciones subjetivas como objetivas.
- El tipo de coeficiente identificado como H (es decir, $\bar{\theta}$ individuales y $\bar{\phi}$ manual) es el peor clasificado en prácticamente todas las imágenes menos en la evaluación subjetiva de la imagen 20.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

En este trabajo se presentó RGBaGris, un enfoque basado en la decolorización espectral, empleando la transformada de Fourier en el dominio espectral, para la transformación de imágenes a color a escala de grises, dentro del espacio CIELab, con la menor cantidad de pérdida de información, preservando los detalles perceptuales.

A través de las evaluaciones aplicadas a una muestra de veinte imágenes a color con distintas características y complejidades, es posible concluir que los coeficientes controlados de forma manual arrojan la máxima calidad perceptual, aunque para algunas imágenes esta selección no es la óptima. El control manual representa un reto para el sujeto que manipula los valores, además de demandar tiempo en su ajuste y sumado a la percepción subjetiva de esta sola persona. Esto no garantiza el mejor resultado para el resto de las personas que evalúan la misma imagen.

Considerando la escala de calidad subjetiva promediada, por razones de confiabilidad a lo largo del tiempo de este tipo de evaluaciones, y los tipos de coeficientes automatizados (A, B, C y D), se puede decir que A ($\bar{\theta}$ promedio y $\bar{\phi}$ promedio) logra obtener una calidad perceptual mayor al canal L del espacio CIELab (J), mientras que B ($\bar{\theta}$ individuales y $\bar{\phi}$ individuales), C ($\bar{\theta}$ promedio y $\bar{\phi}$ individuales) y D ($\bar{\theta}$ individuales y $\bar{\phi}$ promedio) no logran obtener una calidad perceptual mayor a la obtenida por J, ni por alguna combinación, aparte de A, que contenga algún valor de coeficiente controlado de forma manual, como F, G e I. De hecho, creemos que el estudio de los valores manuales seleccionados del tipo de coeficiente identificado como E podría brindar pistas hacia una solución automatizada.

La optimización del código implementado, para manipulaciones en tiempo real en imágenes con alta resolución podría ser un trabajo a futuro, así como la disminución del espacio de almacenamiento de las imágenes en escala de grises. Del mismo modo, se plantea la implementación de RGBaGris un *plugin* o componente para alguna aplicación de edición de imágenes de uso común (e.g. Photoshop, GIMP). Igualmente, es posible aplicar este enfoque en aplicaciones médicas [22] donde el nivel de percepción visual de imágenes en escala de grises es primordial y en muchos casos subjetivo de acuerdo con el evaluador.

REFERENCIAS

- [1] R. Bala y R. Eschbach. *Spatial Color-to-Grayscale Transform Preserving Chrominance Edge Information*, En Proceedings de Color Imaging Conference, pp. 82–862, 2004.
- [2] K. Rasche, R. Geist, y J. Westall. *Re-coloring Images for Gamuts of Lower Dimension*, Computer Graphics Forum, vol. 24, pp. 423–432, 2005.
- [3] Y. Zhao y Z. Tamimi. *Spectral Image Decolorization*, En Bebis G. et al. (eds) *Advances in Visual Computing. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, vol. 6454, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [4] K. McLaren. *XIII—The Development of the CIE 1976 (L*a*b*) Uniform Colour Space and Colour-Difference Formula*, Journal of the Society of Dyers and Colourists, vol. 92, pp. 338–341, 1976.
- [5] C. Kanan y G. W. Cottrell. *Color-to-Grayscale: Does the Method Matter in Image Recognition?*, PLoS ONE, vol. 7, no. 1:e29740, USA, January 2012.
- [6] K. Jack. *Video Demystified: A Handbook for the Digital Engineer*, Newnes, 5ta. Edición, 2007.
- [7] W. Pratt. *Digital Image Processing*, 4ta. Edición, Ed. Wiley-Interscience, 2007.
- [8] A. Bosch, A. Zisserman, y X. Munoz. *Image Classification using Random Forests and Ferns*, En Proceedings de la IEEE 11th International Conference on Computer Vision, pp. 1–8, 2007.
- [9] V. Sowmya, D. Govind, y K. P. Soman. *Significance of Processing Chrominance Information for Scene Classification: A Review*, Artificial Intelligence Review, vol. 53, pp. 811–842, 2020.
- [10] OpenCV team. *Open Source Computer Vision Library*, Disponible en <https://github.com/itseez/opencv>, 2020.
- [11] The MathWorks Inc. *Matlab version 9.2 (R2017a)*, Disponible en <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, 2017.
- [12] R. Gupta, D. Bansal, y C. Singh. *A Survey on Various Objective Image Quality Assessment Techniques*, International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), vol. 2, no. 7, India, pp. 99–104, 2014.
- [13] E. Zerman, V. Hulusic, G. Valenzise, R. Mantiuk, y F. Dufaux. *The Relation Between MOS and Pairwise Comparisons and the Importance of Cross-Content Comparisons*, En Proceedings de Human Vision and Electronic Imaging, 2018.
- [14] T. C. Brown y G. Peterson. *An Enquiry Into the Method of Paired Comparison: Reliability, Scaling, and Thurstone's Law of Comparative Judgment*, Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.
- [15] M. Čadík. *Perceptual Evaluation of Color-to-Grayscale Image Conversions*, T. Igarashi, N. Max, y F. Sillion, Eds. USA: Blackwell Publishing, vol. 27, 2008.
- [16] L. L. Thurstone. *A Law of Comparative Judgment*, Psychological Review, vol. 34, no. 4, pp. 273–286, 1927.
- [17] F. Mosteller. *Remarks on the Method of Paired Comparisons: I. The Least Squares Solution Assuming Equal Standard Deviations and Equal Correlations*, Psychometrika, vol. 16, pp. 3–9, 1951.
- [18] K. Ma, T. Zhao, K. Zeng, y Z. Wang. *Objective Quality Assessment for Color-to-Gray Image Conversion*, En Proceedings del IEEE Transactions on Image Processing, vol. 24, no. 12, pp. 4673–4685, 2015.
- [19] P. Legendre y L. F Legendre. *Numerical Ecology*, Elsevier, 3ra. edición, vol. 24, 2012.
- [20] R. K. Mantiuk, A. Tomaszewska, y R. Mantiuk. *Comparison of Four Subjective Methods for Image Quality Assessment*, Computer Graphics Forum, vol. 31, pp. 2478–2491, 2012.
- [21] K. Tsukida y M. R. Gupta. *How to Analyze Paired Comparison Data*, Reporte Técnico UWEETR-2011-0004, University of Washington, USA, 2011.
- [22] E. Ramírez y E. Coto. *TRAUMAPLAN: para la Planificación Preoperatoria en Traumatología*, Enl@ce: Revista Venezolana de Información, Tecnología y Conocimiento, vol. 8, no. 2, pp. 61–78, 2011.

Índice de Autores

B

Bernal Edgar 22

C

Cabanach Irena 34

G

Gamess Eric 10

L

Llanes Orestes 1

P

Palacio Carlos 10

R

Ramírez Esmitt 22, 34
Rivera Pedro 1

REVECOM

Sociedad Venezolana de Computación

La Sociedad Venezolana de Computación está comprometida con el impulso de una nueva generación académica y profesional en nuestra área de saber para el desarrollo del país.

Los conceptos y puntos de vista expresados en los trabajos publicados en este libro representan las opiniones personales de los autores y no reflejan el juicio de los editores o de la Sociedad Venezolana de Computación.

ISSN: 2244-7040



9 772244 704006

www.svc.net.ve/revecom

